



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NA RESISTÊNCIA DE UMA
BASE RECICLADA PARA PAVIMENTAÇÃO**

Amanda Revorêdo

Lajeado, junho de 2018

Amanda Revorêdo

INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NA RESISTÊNCIA DE UMA BASE RECICLADA PARA PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de conclusão apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II do curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como requisito para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos

Lajeado, junho de 2018

Amanda Revorêdo

INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NA RESISTÊNCIA DE UMA BASE RECICLADA PARA PAVIMENTAÇÃO

A Banca examinadora abaixo aprova o Trabalho de Conclusão apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Civil:

Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos (Orientador)

Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Carolina Becker Porto Fransozi

Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Mateus Lemos Nogueira

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Lajeado, junho de 2018

RESUMO

Sabe-se que a rigidez e o aumento das limitações ambientais, em conjunto com a grande insuficiência de investimentos na infraestrutura brasileira, ocasionam o desenvolvimento de práticas que aliam redução de custos e preocupação ambiental. A reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland enquadra-se nesses dois pontos, pois, de modo geral, reduz a aplicação de materiais virgens e reutiliza o material da via deteriorada. A pesquisa desse trabalho teve como principal objetivo analisar, por meio de ensaios laboratoriais sugeridos pela norma DNIT 167 (DNIT, 2013a), a resistência de misturas recicladas para diferentes tipos de cimento Portland. Para isso, foram analisadas misturas provenientes de duas rodovias distintas, coletadas por métodos diferentes. A coleta 1 apresentou revestimento asfáltico e base, misturados. E a coleta 2 apresentou amostras separadas de revestimento asfáltico e base. A partir da análise granulométrica das amostras, constatou-se que era necessário correção granulométrica apenas da Coleta 1, sendo adicionado 30% de material virgem (em massa). Foi determinado o teor de ligante das amostras, e foram realizados ensaios de compactação para determinação do peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótimo de cada mistura. O teor de cimento foi escolhido de maneira conservadora, adotando o teor de 2,5 % de cimento, conforme o método de dosagem de Fedrigo et al. (2017). Os cimentos adotados para essa pesquisa foram CP II F 32, CP IV 32 e CP V ARI. Foram realizados os ensaios de RCS e RCD. Sendo que, para cada ensaio, foram moldados três corpos de prova, para cada tipo de cimento e cada tempo de cura, de 3 dias e 7 dias. Conforme a norma 167/2013 (DNIT, 2013a), apenas a resistência à tração por compressão diametral foi atingida, resultados entre 0,18 MPa a 0,31 MPa, para os 7 dias de cura. Não foi possível validar o método sugerido por Fedrigo et al. (2017), já que a resistência à compressão simples máxima alcançada, resultados entre 1,27 MPa a 1,76 MPa, para os 7 dias de cura, não atingiu o mínimo esperado pelo mesmo e nem pela norma 167 (DNIT, 2013a). Quanto ao desempenho dos cimentos adotados, o CP II F 32 apresentou melhor desempenho para a reciclagem.

Palavras-chaves: Reciclagem de pavimentos. Influência do cimento. Resistência à compressão. Resistência à tração por compressão diametral.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resposta mecânica do pavimento flexível	16
Figura 2 – Estrutura do pavimento antes e depois da reciclagem.....	23
Figura 3 – Fluxograma para avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem	26
Figura 4 – Caminhão-tanque seguido da recicladora.....	30
Figura 5 – Mapa de localização da RSC – 153	39
Figura 6 – (a) Recicladora responsável pela coleta do (b) material na RSC – 153...	40
Figura 7 – Aspecto visual do material virgem adicionado à primeira coleta	41
Figura 8 – Mapa de localização da RSC – 436	42
Figura 9 – Material coletado na RSC – 436 (a) revestimento asfáltico e (b) BGS.....	43
Figura 10 – Estrutura do aparelho (a) extrator por refluxo e (b) material da primeira coleta pronto para iniciar ensaio.....	46
Figura 11 – Croqui do cilindro e soquete do ensaio de Proctor (dimensões em cm)	48
Figura 12 – Contorno de RCS com 7 dias de cura para as misturas contendo BGS	49
Figura 13 – Realização da (a) ruptura do corpo de prova à compressão simples e (b) à tração por compressão diametral	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução da deterioração do pavimento.....	17
Gráfico 2 – Faixas granulométricas citadas nas normas nacionais para reciclagem com cimento.....	35
Gráfico 3 – Curvas granulométricas do material da primeira coleta e material virgem	41
Gráfico 4 – Curvas granulométricas do material da segunda coleta	43
Gráfico 5 – Curvas granulométricas da mistura corrigida enquadrada aos limites DNIT (primeira coleta)	55
Gráfico 6 – Curvas granulométricas da mistura enquadrada aos limites DNIT (segunda coleta).....	55
Gráfico 7 – Curvas granulométricas das Coletas 1 e 2 enquadradas aos limites Faixa II e Wirtgen	56
Gráfico 8 – Curvas de compactação das misturas	57
Gráfico 9 – Gráfico da média dos resultados da coleta 1	60
Gráfico 10 – Gráfico da média dos resultados da coleta 2	61
Gráfico 11 – Gráfico da média dos resultados da coleta 1	65
Gráfico 12 – Gráfico da média dos resultados da coleta 2	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise comparativa das especificações nacionais em relação ao processo de reciclagem	33
Tabela 2 – Limites das faixas granulométricas propostas pelas especificações de serviço nacionais.....	34
Tabela 3 – Características dos tipos de cimento empregados	44
Tabela 4 – Corpos de prova para cada ensaio.....	50
Tabela 5 – Resultados do ensaio de compactação para as duas misturas.....	57
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de RSC da coleta 1	58
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de RSC da coleta 2.	59
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de RCD da primeira coleta	63
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de RCD da segunda coleta.....	63

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

%	Por cento
°C	Graus célsius
ARI	Alta Resistência Inicial
BGS	Brita graduada simples
CAP	Cimento asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California</i> Bearing Ratio
cm	Centímetros
CP	Cimento Portland
DCP	<i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
DEINFRA	Departamento Estadual de Infraestrutura
DER-PR	Departamento de Estradas e Rodagens do Paraná
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
ISC	Índice de Suporte de Califórnia

kg	Kilogramas
LWD	<i>Light Weight Deflectometer</i>
MPa	Mega Pascal
PR	Paraná
RCD	Resistência à tração por compressão diametral
RCS	Resistência à compressão simples
s	Segundos
SP	São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Estrutura da Monografia	13
 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	 15
2.1 Processos de desgaste e restauração de pavimento flexível	15
2.1.1 Deterioração do pavimento flexível	16
2.1.2 Restauração do pavimento flexível	18
2.2 Reciclagem de pavimento	18
2.3 Técnicas de reciclagem do pavimento	20
2.3.1 Reciclagem de pavimento a quente, <i>in situ</i> e em central	20
2.3.2 Reciclagem de pavimento a frio, <i>in situ</i> e em central	21
2.3.3 Reciclagem semi-quente	22
2.3.4 Reciclagem profunda de pavimento.....	23
2.4 Reciclagem de Pavimentos com adição de cimento Portland	24
2.4.1 Viabilidade de aplicação da técnica de reciclagem.....	25
2.4.2 Procedimento de execução da técnica de reciclagem.....	28
2.4.3 Vantagens e desvantagens da técnica de reciclagem com cimento	30
2.4.4 Normas técnicas nacionais sobre reciclagem com adição de cimento Portland	32
2.5 Influência dos cimentos.....	35
 3 MATERIAIS E MÉTODOS	 38
3.1 Materiais.....	38
3.1.1 Material proveniente da coleta 1	39
3.1.2 Material proveniente da coleta 2	42
3.1.3 Cimento Portland	44
3.2 Métodos.....	44
3.2.1 Caracterização do material.....	45
3.2.1.1 Análise da Granulometria	45

3.2.1.2 Definição do teor de ligante	45
3.2.2 Compactação.....	47
3.2.3 Teor de cimento.....	48
3.2.4 Moldagem dos corpos de prova	50
3.2.5 Resistência à compressão simples	52
3.2.6 Resistência à tração por compressão diametral	53
 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	 54
4.1 Caracterização granulométrica das misturas	54
4.2 Compactação.....	56
4.3 Resistência à compressão simples	58
4.4 Resistência à tração por compressão diametral	62
 5 CONCLUSÃO	 68
 REFERÊNCIAS.....	 71

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), o meio rodoviário é o principal modal de transporte de pessoas e cargas no país. Apesar disso, a infraestrutura é considerada inapropriada e escassa, o que abala a qualidade do serviço e resulta na elevação do custo operacional do transporte, bem como na maior ocorrência de acidentes rodoviários e de impactos ambientais.

Assim, é necessário que haja uma intervenção nas condições da infraestrutura das estradas de rodagem, de modo a proporcionar eficiência e segurança ao transporte rodoviário, resultando no crescimento econômico do Brasil. No entanto, sabe-se que os investimentos destinados a este meio não são suficientes para satisfazer a demanda de manutenção e preservação do pavimento à medida que este envelhece (CNT, 2017).

A rigidez e o aumento de limitações impostas pelas legislações ambientais, aliados às restrições dos investimentos na área, propiciam o desenvolvimento e a prática de tecnologias novas, como é o caso da reciclagem de pavimentos. A reciclagem de pavimento surge, então, como uma forma mais barata e eficiente de restaurar as rodovias já pavimentadas (OLIVEIRA; SANT'ANNA; SOUZA, 2002).

Segundo Schimmoller et al. (apud ARANHA, 2013), há 30 anos os Estados Unidos vêm obtendo êxito ao empregar materiais reciclados na pavimentação. Inclusive, os órgãos governamentais do país introduziram pacotes para incentivo, como a normatização da qualidade e do uso desses materiais, além da

implementação de centros de estudos universitários a fim de promover pesquisas na área.

No Brasil, o emprego da reciclagem de pavimentos está tomando espaço desde o final da década de 1980, por meio de fresadoras de asfalto. No entanto, só a partir da década de 1990 é que chegaram as primeiras recicladoras sobre pneus ao país (PAIVA; OLIVEIRA, 2013). Apesar da evolução da técnica, ela ainda pode ser considerada uma ferramenta jovem, que exige muito estudo para sua execução, pois trata-se da utilização de materiais já empregados que, provavelmente, perderam suas propriedades originais devido ao tempo e ao uso (JOHN; AGOPYAN apud ARANHA, 2013).

Levando em consideração o grande aumento de obras de restauração usando a técnica da reciclagem, optou-se por desenvolver esta pesquisa, em que foram realizados alguns ensaios para maior compreensão do comportamento destes materiais aplicados em pavimentos.

1.2 Objetivos

A seguir, o objetivo geral e os específicos:

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar, por meio de ensaios laboratoriais, sugeridos pela norma nacional, a resistência de misturas recicladas para diferentes tipos de cimento Portland.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar o material, através do teor de ligante e da análise da granulometria;
- b) determinar o teor de cimento utilizado nas misturas recicladas provenientes de pavimento asfáltico, validando ou não o método de dosagem de Fedrigo et al. (2017);
- c) analisar os resultados para os ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, para os diferentes tipos de cimento.

1.3 Estrutura da Monografia

O presente documento divide-se em cinco capítulos, cujos conteúdos são brevemente apresentados a seguir. Neste primeiro capítulo, uma pequena introdução sobre reciclagem e as razões que justificam seu uso, além dos objetivos que se pretende alcançar por meio da realização deste trabalho.

No capítulo 2, por sua vez, destaca-se a revisão bibliográfica do tema principal deste trabalho, em que são descritas a compatibilidade da prática, as normas nacionais e as influências dos cimentos na reciclagem de pavimentos.

Já o capítulo 3 delimita os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa, de acordo com o que é delimitado pela norma DNIT-ES 167/2013 (DNIT, 2013a), para a caracterização do material, compactação, ensaio de resistência à compressão e ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

No capítulo 4 apresentam-se e investigam-se os resultados obtidos através dos ensaios. Por fim, no capítulo 5 expõem-se as conclusões obtidas, assim como sugestões para prosseguimento da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

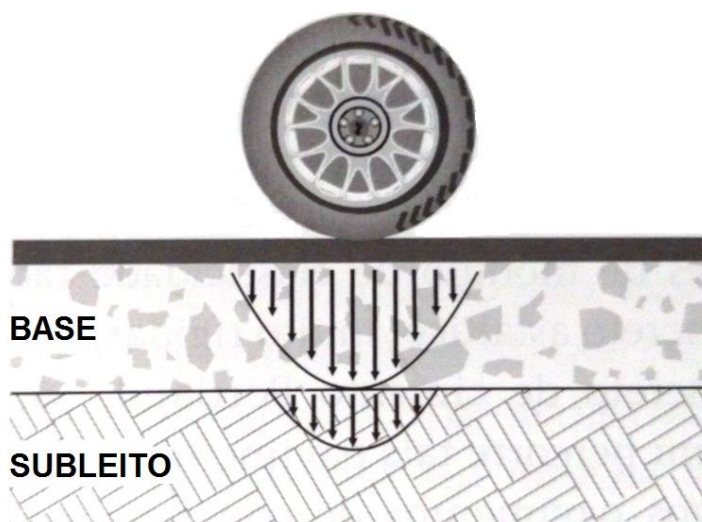
2.1 Processos de desgaste e restauração de pavimento flexível

De acordo com Bernucci et al. (2008), o pavimento é uma estrutura de várias camadas limitadas, construído a partir do subleito, ou seja, está fundamentado na última superfície de terraplenagem. Ele tem como principal função atender aos esforços solicitados pelo tráfego de veículos e pelo clima. Balbo (2007) afirma que se busca atingir essas funções a fim de propiciar um pavimento durável e de menor custo possível, além de proporcionar conforto e segurança para os usuários.

Alguns autores, como Senço (2007) e Bernucci et al. (2008), definem os pavimentos flexíveis como aqueles que apresentam comportamento elástico, pois, até certo limite, as deformações ocasionadas pela passagem dos veículos não levam ao rompimento deste tipo de pavimento. No entanto, podem ocorrer alterações permanentes que provocam o rompimento por fadiga.

Yonder e Witczak apud Balbo (2007) ilustram muito bem o modo como os esforços aplicados sobre o pavimento flexível são distribuídos para o subleito. No pavimento flexível, as tensões são mais concentradas nas proximidades do local onde a carga é aplicada, conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Resposta mecânica do pavimento flexível



Fonte: Baldo (2007, p. 47).

2.1.1 Deterioração do pavimento flexível

As cargas aplicadas no pavimento, geralmente de modo transitório, são geradas não somente pelos veículos, mas também pelo ambiente. Pode-se afirmar, então, que elas são cíclicas ou reincidentes, o que não significa que aconteçam na mesma intensidade. Quando uma carga é aplicada sobre a superfície do pavimento, esta gera tensões em todas as camadas da sua estrutura, dependendo do comportamento mecânico de cada uma das delas. Segundo Balbo (2007), todas as camadas do pavimento possuem, pelo menos, uma função específica e têm como dever dispor aos veículos condições apropriadas de suporte e rolamento em qualquer estado climático.

Nesse sentido, o desgaste do pavimento acontece, sobretudo, devido às sobrecargas dos veículos e às condições climáticas que, no Brasil, são principalmente o sol, a chuva e a temperatura ambiente (BALDO, 2007). A radiação solar, por exemplo, em contato com as camadas de rolamento causa a oxidação do betume, tornando-o quebradiço e com aspecto envelhecido. O aparecimento de trincas potencializa os efeitos da umidade, pois a água das chuvas infiltra pelas fendas e preenche os poros, que exercem pressão quando submetidos a cargas de rodas. Por consequência, essa pressão quebra as ligações do ligante com o

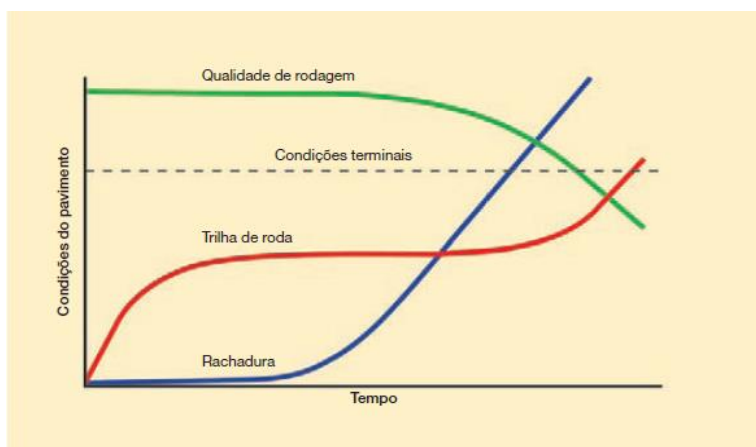
agregado, provocando ainda mais rachaduras e quebra do asfalto (WIRTGEN, 2012). Além disso, quando a água das chuvas infiltra no subleito, da-se a principal causa de perda de suporte da estrutura (OLIVEIRA, 2003).

Oliveira (2003) aponta, também, que os pavimentos de regiões com alta variação de temperatura sofrem com os esforços de dilatação e contração das camadas de revestimento, causando danos severos à sua superfície e acelerando sua deterioração.

Outro fator relevante para a deformação são os efeitos cumulativos dos carregamentos sucessivos, que ocasionam trincas por fadiga, as quais, na fase inicial, se concentram nas trilhas de roda. Além disso, as trincas enfraquecem o revestimento e possibilitam a entrada de água, comprometendo também a estrutura (DNIT, 2006).

Pode-se observar, no Gráfico 1, a evolução da deterioração do pavimento em proporção ao tempo de uso. Percebe-se que, inicialmente, as alterações do pavimento relacionadas aos efeitos climáticos são mais lentas se comparadas aos efeitos de sobrecarga; no entanto, as rachaduras levam a condições terminais antes que as trilhas de roda.

Gráfico 1 – Evolução da deterioração do pavimento



Fonte: Wirtgen (2012, p. 22).

2.1.2 Restauração do pavimento flexível

Para iniciar a restauração de um pavimento, primeiramente, deve-se analisar as condições em que este se encontra, ou seja, deve ser feita uma avaliação funcional e estrutural. A primeira contempla as condições superficiais – irregularidade longitudinal, trincas, o grau das trincas, deformações permanentes – e é realizada por meio de análise visual do segmento. Já a avaliação estrutural, cuja verificação se dá, preferencialmente, através de métodos não destrutivos, define-se pela averiguação da carga que o pavimento é capaz de suportar. Entre os principais levantamentos, são realizados testes de deflexão na superfície e bacia de deformação (BERNUCCI et al., 2008).

A partir dos resultados das análises, é possível delimitar o nível a partir do qual a restauração deve ter início, ou seja, desde qual profundidade deve haver intervenção. Ademais, deve-se considerar a demanda que está sendo solicitada, assim, se o fluxo de veículos aumentou além da expectativa de projeto, é necessário realizar uma intervenção mais profunda, um reforço estrutural.

Neste trabalho será analisada apenas a restauração pelo método da reciclagem de pavimentos, uma vez que, como comentado anteriormente, trata-se de um método de cunho sustentável devido ao baixo uso de materiais virgens, além de ser econômico. Apesar de ser considerada nova, a técnica de reciclagem de pavimentos é defendida como o método mais eficiente na restauração, levando em conta fatores ambientais e econômicos.

2.2 Reciclagem de pavimento

Quando é realizado um planejamento de pavimentação, estima-se um período considerado de projeto, ou seja, calcula-se o aumento de tráfego para determinado período e projeta-se o pavimento para suportar tal aumento.

Segundo os dados da CNT (2017), mesmo com a queda na aquisição de veículos devido à crise, entre 2012 e 2016 a frota brasileira teve um aumento de 23,33 milhões de unidades. Logo, esse incremento tende a gerar maior demanda pela infraestrutura de transporte, com o aumento do fluxo de veículos nas rodovias brasileiras. E esse aumento no tráfego pode ocasionar comprometimento do pavimento.

Segundo Bernucci et al. (2008), quando a estrutura é prejudicada ou o tráfego de veículos cresce, é indicada a restauração ou reforço do mesmo. Para isso, existem alternativas que reconstituem ou melhoram a capacidade estrutural por meio da recapagem, que é a incorporação de novas camadas à estrutura, ou da reciclagem, que se aplica através do tratamento de camadas existentes (BERNUCCI et al., 2008). Esta última será tratada neste trabalho.

Senço (2007) afirma que as recapagens sucessivas de pavimentos acarretam o aumento da espessura da camada de rolamento, o que provoca diversos impasses: a) desníveis formados entre as faixas de rolamento e os acostamentos; b) sobrepeso nas pontes e viadutos; e c) redução da altura útil em túneis. O Manual de Restauração de Pavimentos (DNIT, 2006) aponta, ainda, outros problemas relativos ao ajuste vertical em relação aos mecanismos de drenagens, que são, por exemplo, a altura das sarjetas, do meio fio, bocas de lobo e poços de visita.

Ainda conforme Senço (2007), a solução para evitar esses impasses seria a utilização do mesmo espaço físico da camada a ser restaurada, através do recorte da camada antiga e reposição de uma nova. Dessa forma, é possível reaproveitar ou não o material fresado.

A reciclagem de pavimentos, em relação aos materiais virgens, é uma das soluções mais eficientes encontradas, pois promove a reutilização do material do próprio pavimento a ser restaurado, diminuindo a extração de novos materiais do meio ambiente. Além dessa vantagem, o Manual de Restauração de Pavimentos (DNIT, 2006) aponta outros benefícios: a) conservação de agregados, ligantes e de energia: oferecem redução da demanda e transporte de novos materiais; b) preservação do meio ambiente: sem a necessidade de novos materiais, as jazidas são preservadas e há diminuição de lugares para descarte de materiais; e c)

restauração das condições geométricas existentes: é possível manter a geometria inicial da via, assim como modificá-la facilmente.

A presença de trincas, deformações, desgastes, entre outros, pode ser reduzida ou totalmente eliminada com a reciclagem de pavimentos. Caso haja necessidade de aumento do suporte do pavimento, deve ser acrescentada uma nova camada de rolamento. Então, a camada reciclada se tornará uma nova base ou sub-base ou, ainda, poderá funcionar como um reforço do subleito (OLIVEIRA; BARAN; SCHMIDT, 2010).

A fresagem para restauração do pavimento pode ser superficial quando se destina à correção de irregularidade existente na superfície do pavimento; raso, atingindo as camadas de ligação até 5 cm de profundidade, para consertos de defeitos funcionais e remendos superficiais; e profundo, que atinge camadas mais profundas, como a base e a sub-base, visando à recomposição ou ao aumento da estruturação do pavimento (ESTEVES, 2014).

2.3 Técnicas de reciclagem do pavimento

Existem várias técnicas de reciclagem de pavimento: pode ser a frio ou a quente, com ou sem adição de ligantes ou aditivos. A *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 2001) define cinco categorias para classificar os processos executivos de reciclagem: reciclagem a quente em central, reciclagem a quente *in situ*, reciclagem a frio em central, reciclagem a quente *in situ* e reciclagem profunda. Branco, Pereira e Santos (2016) defendem também a existência da categoria semi-quente.

2.3.1 Reciclagem de pavimento a quente, *in situ* e em central

A reciclagem de pavimento a quente é muito similar à produção da mistura convencional, inclusive a central de produção é praticamente a mesma, exceto por

algumas adaptações. O material fresado retirado da pista é reutilizado em campo ou é transportado até a central para ser aquecido e incorporado à mistura, com ou sem agregados novos (ARANHA, 2013).

Já a reciclagem a quente *in situ* necessita de equipamentos cujos recursos propiciem nova mistura e distribuição com acabamento. Segundo Branco, Pereira e Santos (2016), existem dois processos: termorregeneração, que consiste no aquecimento do pavimento, pequenas incisões sobre a superfície, recomposição, aplainamento e compactação da nova camada; e termorreperfilagem, que compreende o aquecimento do pavimento continuado da sua compactação. Seu propósito é fechar as fendas e regularizar o perfil longitudinal, tudo isso sem adição de misturas e de novos materiais.

A reciclagem realizada em central, por sua vez, compreende a mistura em proporções adequadas de material reciclado e virgem. O processo se dá a partir da transferência de calor, ou seja, o material virgem é superaquecido antes de entrar em contato com o material fresado, pois não é indicado que este seja exposto a altas temperaturas, já que isso poderia causar uma deterioração extra no material (SENÇO, 2001).

Alguns ligantes que podem ser usados na mistura a quente do pavimento reciclado são os hidrocarbonados (betume, emulsão betuminosa), além do aditivo rejuvenescedor (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2016).

2.3.2 Reciclagem de pavimento a frio, *in situ* e em central

A reciclagem de pavimento a frio pode ser realizada em usina, onde o material fresado é dosado e misturado e, também, *in situ*, em que é utilizada uma recicladora (WIRTGEN, 2012). Conforme ressaltam Branco, Pereira e Santos (2016), o processo *in situ* a frio é o mais econômico no que se refere ao consumo energético, já que o custo de transportes é praticamente ausente.

Segundo Wirtgen (2012), as principais vantagens do método de central em relação ao tratamento *in situ* são: controle de insumos, pois a reciclagem *in situ* não

possibilita a seleção do material fresado, já a partir da mistura na central pode-se obter combinações de diferentes agregados nas devidas proporções, de acordo com o produto exigido; qualidade da mistura, pois é possível realizar ajustes no misturador a fim de aumentar ou diminuir o tempo pelo qual o material é confinado na câmara de mistura; e capacidade de pilhas de estocagem, especialmente com materiais compostos de betume, de modo que o uso ocorre de acordo com a necessidade, subtraindo-se a imediação dos processos de mistura e execução da pavimentação.

Segundo DNIT (2006), a principal desvantagem do método de central está relacionada ao custo envolvendo o transporte do material fresado até a central e este de volta até o local da obra. Este método torna-se desvantajoso, também, em relação ao tempo, quando há necessidade de liberar o tráfego imediatamente.

2.3.3 Reciclagem semi-quente

Segundo Branco, Pereira e Santos (2016), a reciclagem semi-quente trata-se de um processo mais recente cujo objetivo é eliminar algumas limitações dos processos a frio e a quente. Além disso, ela permite reciclar 100% do material fresado originário da obra. Contudo, é necessária uma central de mistura, contínua ou descontínua, bem como o aquecimento do material de 80°C a 90°C e após, a fusão deste com uma emulsão betuminosa (SÁNCHEZ, apud TORRES, 2009).

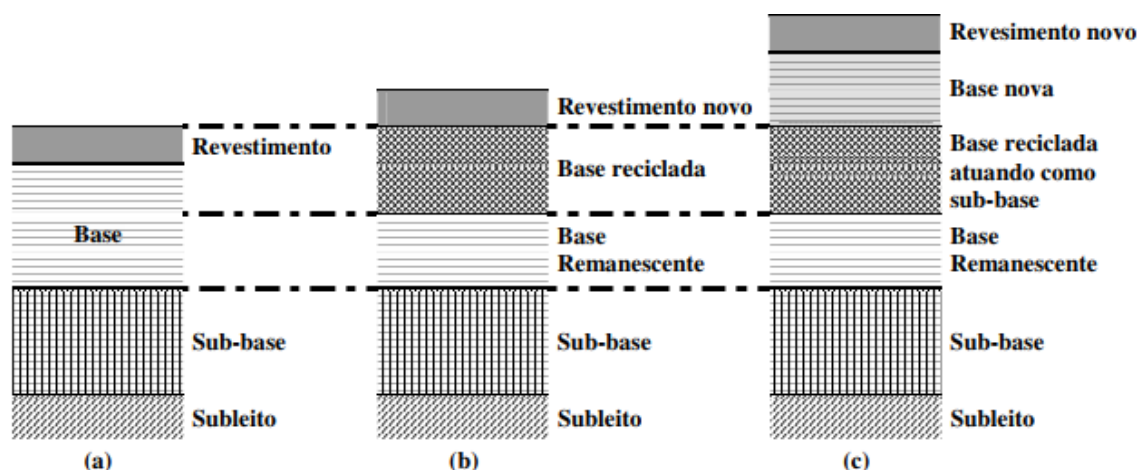
Conforme Branco, Pereira e Santos (2016), nesse processo o ligante empregado é uma emulsão específica para esta finalidade, utilizando teores que variam de 2% a 3%. Ademais, após a fabricação, o material pode ser armazenado por até 24 horas, desde que seja mantido a uma temperatura de 60°C. Este método, portanto, é ideal para as estações do ano em que as condições meteorológicas são mais instáveis.

Torres (2009) aponta que, devido ao aquecimento a que foi submetido o material fresado, o tráfego pode ser aberto de forma imediata após a execução. Desse modo, elimina-se o tempo de cura necessário na reciclagem a frio.

2.3.4 Reciclagem profunda de pavimento

A reciclagem profunda de pavimento é a técnica em que o tratamento não acontece somente no revestimento do pavimento, mas também pode atingir a base, sub-base e até camadas de reforço do subleito, conforme pode ser visto na Figura 2. Isso porque, segundo Oliveira, Baran e Schmidt (2010), a camada reciclada pode ser transformada numa nova base ou sub-base ou, ainda, pode atuar como uma camada de reforço do subleito.

Figura 2 – Estrutura do pavimento antes e depois da reciclagem



(a) Estrutura original do pavimento;

(b) Estrutura do pavimento após reciclagem – Camada reciclada atuando como base;

(c) Estrutura do pavimento após reciclagem – Camada reciclada atuando como sub-base.

Fonte: Oliveira; Baran e Schmidt (2010, p. 2).

Geralmente, usa-se esse tipo de reciclagem quando existem problemas estruturais no pavimento. Desse modo, intercede-se na profundidade, onde há a adversidade, criando uma nova camada com o material misturado. Essa camada pode ser mais espessa e, se necessário, enriquecida com aditivos estabilizadores, além da regularização granulométrica nos casos em que o pavimento precisa de fortalecimento (WIRTGEN, 2012). Ressalta-se que as espessuras de intervenção no pavimento variam de acordo com a estrutura do pavimento existente e a profundidade em que ocorre a adversidade, oscilando entre 10 cm e 30 cm (ARRA, 2001).

São diversos os aditivos estabilizadores que podem ser utilizados, sejam eles em forma líquida ou seca. A ARRA (2001) cita alguns, como cloreto de cálcio, cloreto de magnésio, cal (hidratada ou virgem), cinzas volantes (tipo C ou F), pó do forno de cimento (CKD) ou pó do forno de cal (LKD), cimento Portland (seco ou em pasta), emulsão de asfalto (normal, alto-flutuante, polímero), asfalto espumado ou expandido, e combinações de dois ou mais desses aditivos.

Em geral, o cimento é o agente estabilizador mais usado no mundo. Levando em conta a utilização mundial de agentes estabilizadores, seu emprego ultrapassa o uso de todos os demais agentes somados. Os motivos cruciais disso são o custo e a disponibilidade, dado que se trata de um material produzido na maioria dos países e considerado de baixo valor. Outra razão, ainda, é a aceitação como material na indústria da construção (WIRTGEN, 2012).

O objeto de pesquisa deste trabalho são principalmente, materiais provenientes da reciclagem profunda de pavimentos com adição de cimento Portland. Por isso, no próximo subcapítulo, será investigada e descrita apenas essa técnica.

2.4 Reciclagem de Pavimentos com adição de cimento Portland

A norma DNIT-ES 167 (DNIT, 2013) define a reciclagem profunda de pavimento com adição de cimento Portland como um processo de reestruturação parcial do pavimento, dispondo de equipamentos próprios para esse fim. Empregam-se materiais presentes na estrutura do pavimento, além de cimento Portland, agregados (se necessário) e água; todos materiais adicionados em medidas previamente definidas no projeto de dosagem, e emulsão asfáltica para pintura de proteção.

Conforme a *Portland Cement Asssociation* (apud FEDRIGO, 2015), o objetivo do emprego do cimento Portland é que, ao finalizar o processo de reciclagem, executando a correta compactação da mistura reciclada e a camada de revestimento, tenha-se uma nova estrutura partindo da utilização do pavimento

degradado. Esta deverá apresentar uma base estabilizada mais homogênea e resistente, que proporcionará um melhor desempenho em relação ao pavimento original. Será uma camada com maior durabilidade e menor exigência no que se refere aos esforços de manutenção.

A principal função da adição de cimento ao fresado é o ganho de resistência devido ao aumento desta à tração ou à compressão ou, ainda, em virtude da redução da plasticidade. No entanto, quando se ganha resistência, também a fragilidade do material é aumentada, ocasionando a redução de flexibilidade. Dessa forma, proporcional ao ganho de resistência da camada são as tensões repetidas da carga gerada pelo tráfego, o que propicia o aparecimento de trincas e afeta estruturalmente o pavimento (WIRTGEN, 2012).

Segundo Paiva e Oliveira (2009), usualmente, são acrescentados baixos teores de cimento na mistura para alcançar uma camada estabilizada granulometricamente e de comportamento flexível. Sabendo dos efeitos desfavoráveis no desempenho do pavimento, causados pela rigidez acentuada e pela retração do cimento, buscam-se valores não elevados de módulo de resiliência.

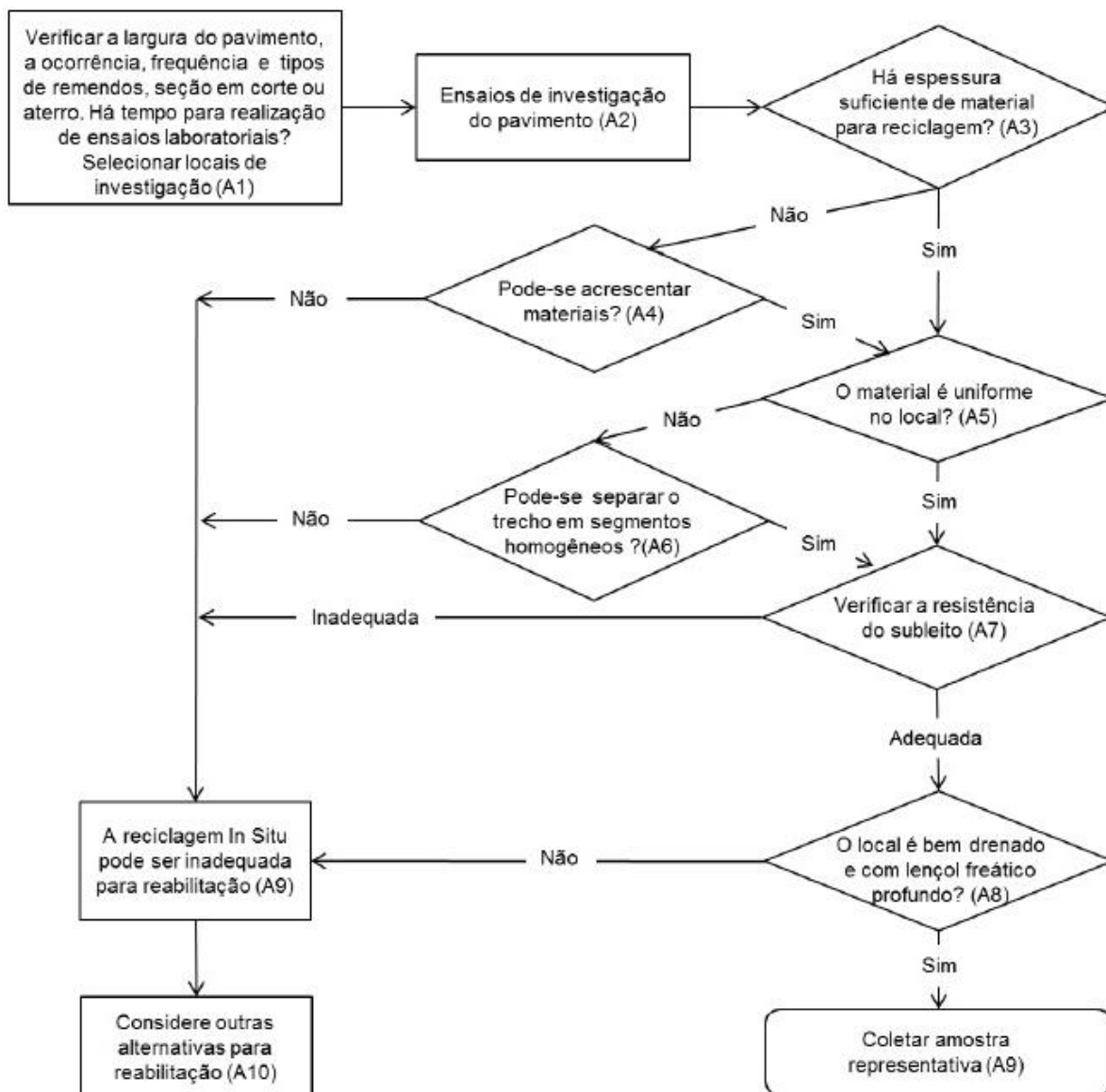
2.4.1 Viabilidade de aplicação da técnica de reciclagem

Quanto à reciclagem a frio, o Manual da Wirtgen (2012) cita três fatores primordiais que tornam este método o mais indicado a ser adotado: tipo de deterioração do pavimento que necessita de tratamento, qualidade do material encontrado nas camadas a serem recicladas e resultado pretendido, ou seja, a vida útil esperada.

Para adoção da técnica de reciclagem com cimento, a *Portland Cement Association* (PCA, 2017) faz referência a algumas situações: o pavimento está altamente danificado e uma simples recapagem não é suficiente; as deteriorações mostram que os problemas se encontram na base ou sub-base; as deteriorações indicam que são necessários reparos profundos, ultrapassando 15% a 20% da superfície, e, ainda, a estrutura está inadequada para o tráfego, atual ou futuro.

A Austroads (2002) indica um fluxograma (FIGURA 3) que apresenta um passo-a-passo da avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem. Abaixo da ilustração, são apresentadas as notas que esclarecem dúvidas a respeito dos procedimentos indicados, por meio de legenda:

Figura 3 – Fluxograma para avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem



Fonte: Austroads (apud FEDRIGO, 2015, p. 34).

a) A1 – Determinação do local de investigação: através de dados históricos e, se possível, dados levantados por meio de georradars ou, ainda, através de outros testes de investigação da capacidade de suporte das camadas, como DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*). Após a determinação desses locais,

deve-se realizar medições das deflexões através de FWD (*Falling Weight Deflectometer*) ou, ainda, Viga Benkelman ou LWD (*Light Weight Deflectometer*).

b) A2 – Realização de ensaios *in situ*: deve-se coletar quantidade suficiente de materiais que constituem o pavimento para investigação através de análise de granulometria, índice de plasticidade e ISC (Índice de Suporte de Califórnia). Além disso, nesta etapa, deve-se verificar se o material é adequadamente triturado pela recicladora;

c) A3 – Verificação do material da base: caso este material seja insuficiente, opta-se pela utilização, também, da sub-base, principalmente se o material da sub-base for de má qualidade, pois com a reciclagem, é possível observar uma melhora no comportamento do material.

d) A4 – Adição de materiais na mistura: está condicionada à possibilidade de mudança na geometria da pista. Deve-se verificar se, após a adição do material, a curva granulométrica continua adequada à reciclagem, pois a inviabilidade de acrescentar novos materiais pode descartar o uso da reciclagem;

e) A5 – Verificação da uniformidade dos materiais locais, considerando o teor de umidade e aparência física;

f) A6 – Separação dos trechos em segmentos homogêneos: determinados através da análise do tipo de material, espessura da camada e resistência ao suporte.

g) A7 – Verificação da resistência do subleito: a norma australiana indica um ISC (ou CBR) mínimo exigido de 5% para que o subleito suporte os esforços de compactação necessários a fim de que a camada estabilizada atinja o peso específico estabelecido. Fedrigo (2015) salienta que a maioria dos subleitos brasileiros apresenta capacidade de suporte mais elevado, sugerindo, então, que esse valor seja revisto. No entanto, para evitar o comprometimento da vida de fadiga da camada reciclada, é de extrema importância evitar que o quociente entre os módulos de deformação elástica

da camada e do subleito seja muito elevado. Visto que, normalmente, os módulos das camadas recicladas com adição de cimento são elevados, é imprescindível que o subleito não seja exageradamente deformável. Fedrigo (2015) enfatiza, ainda, que como o ensaio de ISC não apresenta informações acerca de deformabilidade elástica, deve ser realizada uma melhor avaliação por meio de bacias deflectométricas;

h) A8 – Drenagem: se o local não for bem drenado e não for possível instalar a drenagem, é contraindicado o uso da reciclagem.

i) A9 – Adequabilidade: com base nos dados levantados, confirma-se a compatibilidade da reciclagem para a reabilitação do pavimento. Então, deve-se coletar mais material para a realização do projeto de dosagem adequada em laboratório;

j) A10 – Não compatibilidade: considere outras opções de técnicas de restauração do pavimento.

2.4.2 Procedimento de execução da técnica de reciclagem

Depois de confirmada a viabilidade do processo de reciclagem, conforme item 2.4.1, tem início a coleta do material em campo para que seja feito o projeto de dosagem em laboratório. Todo procedimento construtivo apresentado será apoiado pela norma DNIT-ES 167 (DNIT, 2013), a qual inviabiliza a execução caso não seja feita limpeza e remoção de obstáculos previamente, caso não haja aprovação em relação ao projeto de dosagem e métodos de trabalho, nos dias em que a temperatura ambiente seja inferior a 5°C e superior a 35°C, ou em dias de chuva. A seguir são apresentadas as etapas do procedimento, conforme DNIT-ES 167 (DNIT, 2013):

a) Sendo necessária a correção granulométrica, inicia-se o processo espalhando o agregado adicional sobre o pavimento a ser reciclado. Este deve ser, preferencialmente, realizado com distribuidor de agregados, no entanto, admite-se o emprego de motoniveladora;

- b) em seguida, começa o espalhamento de cimento sobre a superfície, na taxa apontada no projeto de dosagem. Indica-se que o espalhamento seja feito com distribuidor que possua controle eletrônico, garantindo a precisão da taxa de aplicação; excepcionalmente, poderá ser adotado o espalhamento manual, desde que se garanta a uniformidade da taxa de cimento. Ainda, o tempo máximo para aplicação do cimento antes do início da mistura é de 30 minutos;
- c) ao terminar as etapas anteriores, começa a reciclagem utilizando máquina recicladora, a qual é dotada de câmara de mistura com dispositivo que permite fragmentação dos materiais, restringindo o diâmetro máximo, além de dispositivo que ajusta a taxa de aplicação da água de acordo com a velocidade de avanço. Nessa etapa, todos os materiais previamente espalhados e a água são misturados com o pavimento triturado, na espessura indicada em projeto. Logo após, é realizada a pré-compactação a fim de evitar a perda de umidade e confinar a mistura;
- d) o caminhão-tanque responsável pelo abastecimento de água da recicladora é posicionado na frente dela (FIGURA 4), enquanto os rolos compactadores e motoniveladoras ficam posicionados atrás, formando um trem de reciclagem;
- e) concluída a pré-compactação, inicia-se a compactação final com o auxílio da motoniveladora, a fim de modelar a superfície, conforme especificado em projeto. Essa compactação deve ser concluída dentro do prazo de trabalhabilidade do material reciclado, o qual não deve ultrapassar duas horas. Finaliza-se a reciclagem com uma pintura de proteção que deve ser isenta de solventes, o que evitará a evaporação da água, mas constituirá uma membrana que gera coesão superficial, impermeabilização e condições de aderência entre superfície e o revestimento. O tráfego só poderá ser liberado após a execução da capa selante sobre a pintura de proteção, e depois de três dias, no mínimo, da execução da camada reciclada. No entanto, a aplicação do revestimento final só poderá ser realizada após a camada, devidamente tratada, ser submetida à ação do tráfego em um intervalo de 3 a 7 dias.

Figura 4 – Caminhão-tanque seguido da recicladora



Fonte: Da autora (2018).

2.4.3 Vantagens e desvantagens da técnica de reciclagem com cimento

Diversos autores compartilham a mesma visão de que as vantagens da reciclagem de pavimento são inúmeras e não se limitam apenas aos benefícios econômicos, mas também em técnicos e ambientais. A Wirtgen (2012) cita algumas mais relevantes, dentre elas:

- a) vantagens ambientais: devido à reutilização do material do próprio pavimento, o uso de novos materiais é minimizado, reduzindo áreas de bota-fora, assim como o transporte e danos causados devido ao peso do trânsito nas áreas próximas à obra;
- b) a perturbação do subleito é minimizada: já que a recicladora passa uma única vez e desloca-se sobre o material reciclado, não entra em contato com as camadas inferiores do pavimento;
- c) tempo de construção mais curto: devido à alta taxa de produtividade das recicladoras quando comparadas a outros métodos, além da redução de tempo, obtém-se diminuição de custo e de interferência no trânsito;
- d) qualidade e integridade estrutural da camada reciclada: as recicladoras modernas, que possuem sistema de bombeamento preciso e cilindro de corte especial para promover uma mistura bem homogênea, são capazes de produzir camadas espessas de material ligado, além de mistura consistente e de alta qualidade;
- e) eficiência de custo: todas vantagens citadas acima fazem da reciclagem a frio o método mais atrativo de recuperação de pavimentos em relação ao custo e à eficácia.

A Wirtgen (2012) apresenta, ainda, algumas vantagens específicas da adição do cimento como estabilizador: disponibilidade, pois trata-se de um material encontrado em todo o mundo; facilidade de aplicação, já que pode ser espalhado manualmente na ausência de máquinas; aceitação, uma vez que é produto conhecido mundialmente pela indústria da construção; resistência à compressão e propriedades de durabilidade maiores do que outros materiais; e, novamente, o custo, que é mais em conta se comparado a outros estabilizadores.

Todas técnicas possuem algumas limitações e desvantagens, e a reciclagem de pavimento não é diferente, dentre essas, destacam-se:

- a) heterogeneidade: se o pavimento apresentar uma estrutura não uniforme no trecho a ser reciclado, o resultado da reciclagem pode ser mais

heterogêneo do que a construção de uma nova camada (MINGUELLA, 2011);

- b) rachaduras: inevitável aparecimento de rachaduras devido à retração, mas podem ser minimizadas (WIRTGEN, 2012);
- c) rigidez: aumento da rigidez do pavimento flexível, tornando-o mais frágil (WIRTGEN, 2012).

Fazendo um balanço das vantagens e desvantagens do uso da reciclagem de pavimentos, ela pode ser considerada uma das técnicas mais eficazes, pois os prós da sua aplicação sobrepõem-se aos contras.

2.4.4 Normas técnicas nacionais sobre reciclagem com adição de cimento Portland

As normas técnicas nacionais sobre reciclagem de pavimento com adição de cimento Portland ainda são poucas. Em geral, são especificações de serviço desenvolvidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), pelos Departamentos de Estradas de Rodagem dos estados de Paraná (DER-PR) e de São Paulo (DER-SP) e, também, pelo Departamento de Infraestrutura de Santa Catarina (DEINFRA-SC). A relação dessas especificações encontra-se a seguir:

- a) DER-PR ES-P 33 – Pavimentação: Reciclagem de pavimento *in situ* com adição de cimento (DER-PR, 2005);
- b) DER-SP ET-DE-P00/035 – Reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com cimento e brita (DER-SP, 2006);
- c) DEINFRA-SC ES-P-09 – Reciclagem profunda de pavimento com adição de cimento Portland (DEINFRA-SC, 2012);
- d) DNIT-ES 167 – Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço (DNIT, 2013a).

Ao analisar as especificações recém listadas, pode-se observar uma desconformidade de alguns aspectos propostos no processo de reciclagem de pavimento. Constata-se que alguns departamentos são semelhantes em alguns itens. Por exemplo, o DEINFRA de Santa Catarina e o DNIT são praticamente idênticos nos elementos analisados, já os Departamentos de Estradas de Rodagem do Paraná e de São Paulo possuem algumas semelhanças entre si; no entanto, como citado anteriormente, divergentes dos demais. Os aspectos estão apresentados na Tabela 1, adaptada de Kleinert (2016), acrescentando apenas os itens de Limite de liquidez, Índice de plasticidade e Tipo de cimento, que é o principal ponto de pesquisa deste trabalho e será abordado no item 2.5.

Tabela 1 – Análise comparativa das especificações nacionais em relação ao processo de reciclagem

Item analisado	Especificações de serviço			
	DER-PR ES-P 33/05	DER-SP ET- DE-P 00/035	DEINFRA-SC ES-P-09/12	DNIT-ES 167/2013
Profundidade de corte mínima atingida pela recicladora (cm)	Não determina	12	30	30
Teor máximo de material fresado do revestimento asfáltico (%)	Não determina	Não determina	50	50
Tipo de cimento	Não determina	Não determina	CP II E, CP II F e CP II Z de classe 32 - e CP IV	CP II E, CP II F e CP II Z de classe 32
Energia de compactação	Intermediária	Intermediária	Modificada	Modificada
Grau de compactação mínimo de campo (%)	100	100	98	98
Tolerância para o teor de umidade ótimo em campo (%)	+/- 1	-2 e +1	Não determina	Não determina
Limite de Liquidez (%)	≥ 25	Não determina	Não determina	Não determina
Índice de plasticidade (%)	≥ 6	Não determina	Não determina	Não determina
Resistência à compressão simples aos 7 dias de cura (MPa)	3,5 a 8	Não determina	2,1 a 2,5	2,1 a 2,5
Resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias de cura (MPa)	Não determina	Não determina	0,25 a 0,35	0,25 a 0,35
Liberação ao tráfego da camada reciclada	Após 7 dias de cura	Após salgamento, desde que a camada apresente resistência compatível com as solicitações impostas	Período de 3 a 7 dias, para que eventuais deficiências possam ser verificadas e sanadas	Após salgamento, durante 3 a 7 dias, para que eventuais deficiências possam ser verificadas e sanadas

Fonte: Adaptado de Kleinert (2016).

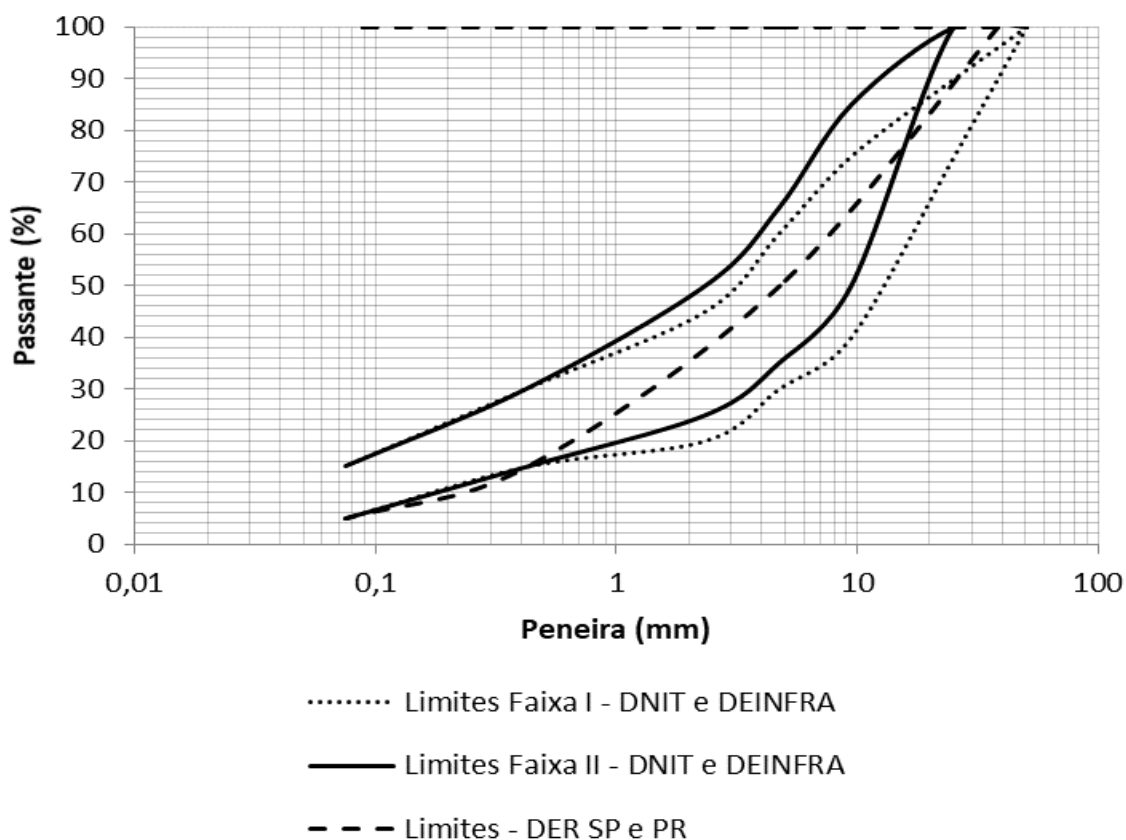
Os materiais reciclados precisam se enquadrar em alguns aspectos para que seja possível a aplicação da reciclagem. Dentre esses critérios, estão as faixas granulométricas estabelecidas pelos departamentos (TABELA 2), que repetem as coincidências dos itens analisados anteriormente, ou seja, o DEINFRA-SC e o DNIT apresentam parâmetros iguais, assim como os Departamentos de Estradas de Rodagem de PR e SP (KLEINERT, 2016). As faixas granulométricas são apresentadas no Gráfico 2.

Tabela 2 – Limites das faixas granulométricas propostas pelas especificações de serviço nacionais

Peneira (mm)	Limites DNIT e DEINFRA-SC (%)				Limites DER-SP e DER-PR (%)	
	Faixa I (II)		Faixa II (III)		Mínima	Máxima
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
50,8	100	100	100	100	-	-
38,1	-	-	-	-	100	100
25,4	75	90	100	100	-	-
9,5	40	75	50	85	-	-
4,75	30	60	35	65	50	100
2,36	20	45	25	50	-	-
0,425	15	30	15	30	15	100
0,075	5	15	5	15	5	100

Fonte: Kleinert (2016, p. 35).

Gráfico 2 – Faixas granulométricas citadas nas normas nacionais para reciclagem com cimento



Fonte: Adaptado de Fedrigo (2015).

Nas normas, são realizadas algumas considerações a respeito da execução. Todas exigem que sejam previamente aprovados o projeto de dosagem e a metodologia do trabalho, reprovam a execução em dias de chuva e impossibilitam a execução em temperaturas inferiores a 5°C e superiores a 35°C, com exceção do DER-PR, que não estabelece temperatura.

2.5 Influência dos cimentos

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002) define o cimento Portland como um pó fino que possui propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, o qual se torna endurecido na presença de água. Uma vez que endurece, torna-se resistente à água, não se decompondo mais.

O clínquer é um dos principais componentes do cimento Portland, tem como matérias-primas o calcário ou giz, extraídos das rochas calcárias, e a sílica e alumina, encontradas em argilas ou folhelhos (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A produção do clínquer se dá através da moagem dessas matérias-primas que, após se tornarem um pó extremamente fino, são misturadas em quantidades predeterminadas e queimadas em um grande forno rotativo que atinge temperaturas necessárias para a modificação química que leva à sua produção. O clínquer produzido sai do forno ainda incandescente e é bruscamente resfriado. Após esse resfriamento, é adicionada uma parcela de gipsita, utilizada para controle de pega, os quais são novamente moídos (BAUER, 2016).

Estão disponíveis no mercado diversos tipos de cimento Portland que são fabricados a partir da adição de outras matérias-primas ao clínquer no período de moagem, tais como, gesso, escória de alto-forno, materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (ABCP, 2002).

O gesso é a gipsita, citada anteriormente, total ou parcialmente desidratada, e tem como principal função retardar o tempo de pega, pois o clínquer puro moído, sem adição de gesso, em contato com a água, endureceria quase que imediatamente e tornaria inviável sua aplicação na construção civil. Deste modo, o gesso está presente em todos os tipos de cimento, mesmo que em quantidades pequenas, geralmente 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa (ABCP, 2002).

A Associação Brasileira de Cimento Portland (2012) afirma que a adição de escórias de alto forno ao clínquer+gesso, em proporções predefinidas, tem como resultado um cimento com alta durabilidade e alta resistência final. E que os materiais carbonáticos, conhecidos como filler calcário, funcionam como lubrificante, pois são constituídos por grãos tão finos com granulometria apropriada para se alojar entre as partículas dos demais componentes do cimento, tornando concretos e argamassas mais trabalháveis.

Ainda, segundo a DNIT-EM 050 (DNIT, 2004), as pozolanas sozinhas são nulas ou possuem pouca atividade aglomerante. Quando adicionadas ao clínquer+gesso, no processo de hidratação o clínquer libera hidróxido de cálcio (cal),

o qual reage com a pozolana; formam um composto com propriedades cimentícias, concedendo alta permeabilidade aos concretos e argamassas.

Pode-se dizer, então, que o desempenho do cimento Portland está diretamente relacionado com o tipo de adição realizada, seja ela de escória, materiais pozolânicos ou carbonáticos, ou uma combinação destas. O desempenho da reciclagem de pavimento asfáltico com adição de cimento Portland também é influenciado pelas propriedades apresentadas em cada tipo de cimento. Deste modo, esse trabalho analisará apenas a influência de três tipos de cimento, quanto às resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral, quando este é utilizado como estabilizador.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo refere-se à apresentação das diversas etapas executadas a fim de atingir os resultados propostos nesta pesquisa. Para esse fim, são apontados, a seguir, os materiais utilizados (material proveniente da primeira e segunda coleta e cimento), assim como os métodos adotados na execução dos ensaios.

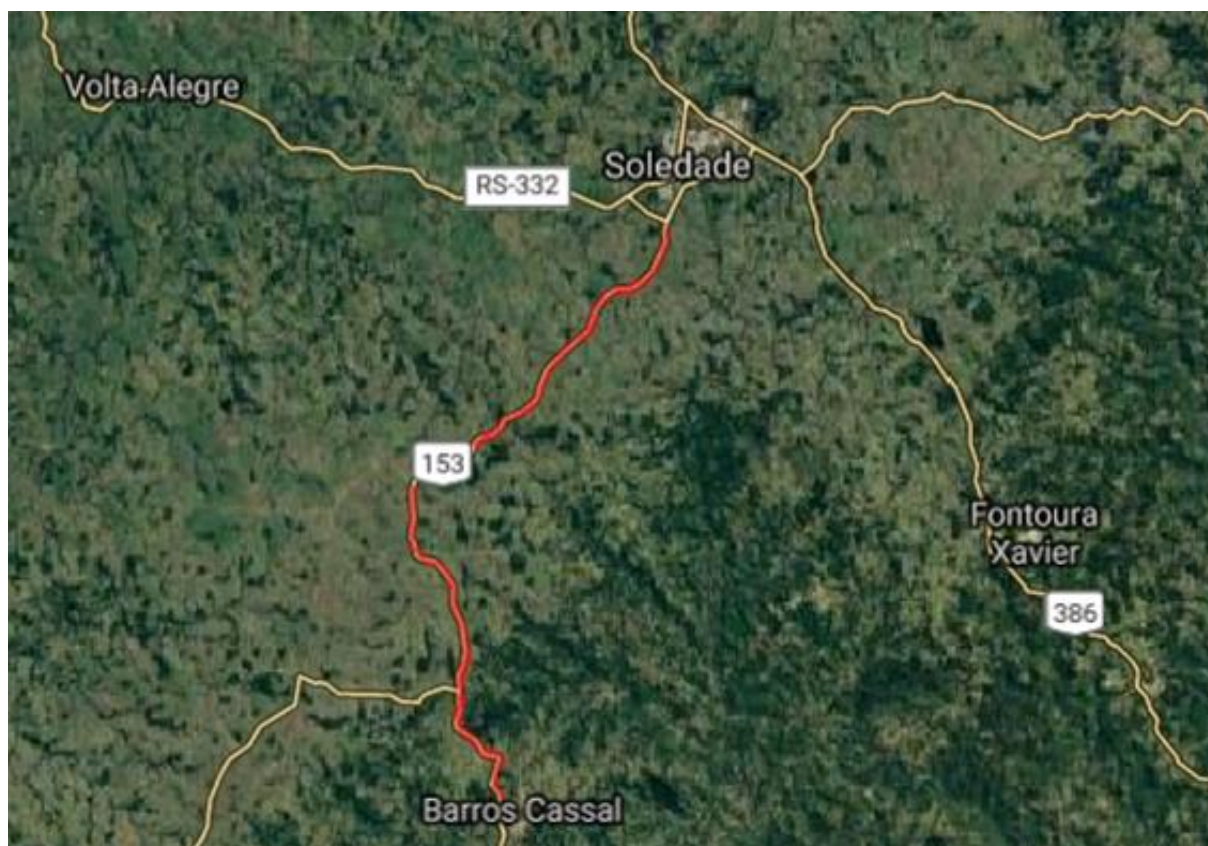
3.1 Materiais

A presente pesquisa busca estudar o comportamento estrutural de um pavimento reciclado com adição de cimento Portland. O material reciclado, proveniente da mistura de base e fresado asfáltico, foi coletado pela construtora responsável pela restauração do trecho da rodovia RSC-153, e será detalhado na sequência, assim como o material fresado e BGS, proveniente da rodovia RSC-436, os quais são identificados de coleta 1 e coleta 2, respectivamente. Salienta-se que nenhuma das extrações foi acompanhada pela autora. São especificados, também, os tipos de cimento utilizados na mistura.

3.1.1 Material proveniente da coleta 1

O material da primeira coleta é oriundo da rodovia RSC-153, km 225 + 960m, localizada no Rio Grande do Sul, entre as cidades de Soledade e Barros Cassal (FIGURA 5). A extração foi realizada com auxílio da recicladora Terex, modelo RS 446C, onde foi triturado 20 cm de espessura, sendo 4 cm de revestimento asfáltico e 16 cm de base (brita graduada simples). Não foi possível a extração individual do material, ou seja, não foi possível recolher amostras do fresado asfáltico e da base, separadamente. Apresenta-se, então, o material já misturado, coletado *in situ* (FIGURA 6).

Figura 5 – Mapa de localização da RSC – 153



Fonte: Google Maps (2017, texto digital).

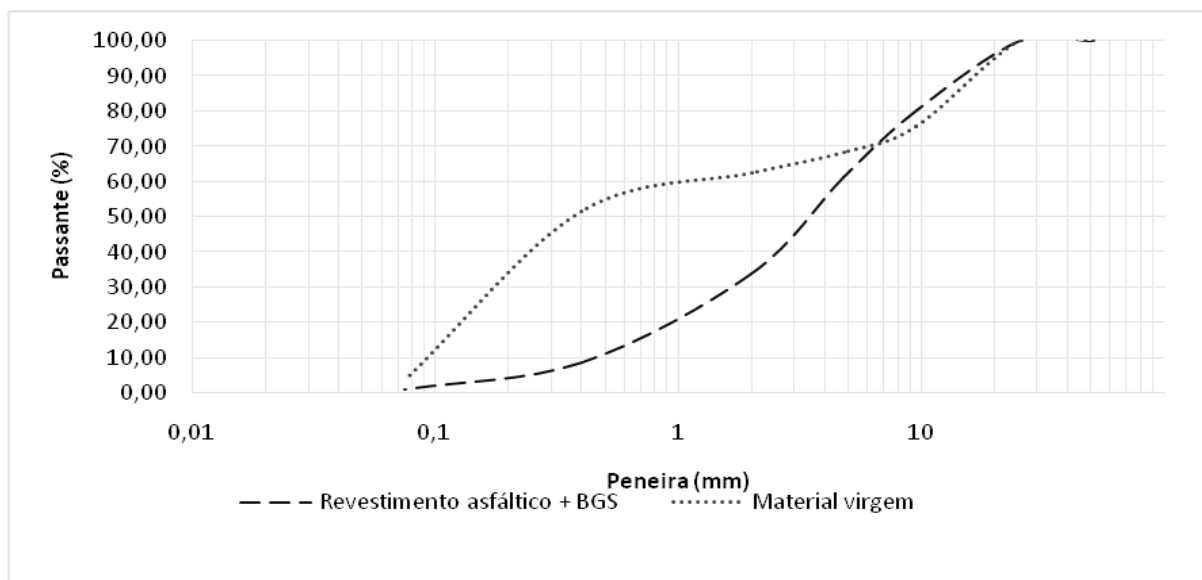
Figura 6 – (a) Recicladora responsável pela coleta do (b) material na RSC – 153



Fonte: Da autora (2018).

O Gráfico 3 exibe a curva granulométrica da coleta 1 (revestimento asfáltico + BGS). Como essa não atingiu o limite mínimo nas peneiras 40 e 200, foi necessária a adição de material virgem para corrigir a granulometria. Para isso, foi levado em conta o enquadramento da faixa II do DNIT, e também, a deficiência de material para realização dos ensaios. Deste modo, adicionou-se 30% de uma mistura de brita 1, areia e pó de brita (FIGURA 7), cuja curva também é apresentada a seguir. Ressalta-se que a adição do material virgem foi realizada sobre a massa total do material da coleta 1.

Gráfico 3 – Curvas granulométricas do material da primeira coleta e material virgem



Fonte: Da autora (2018).

Figura 7 – Aspecto visual do material virgem adicionado à primeira coleta



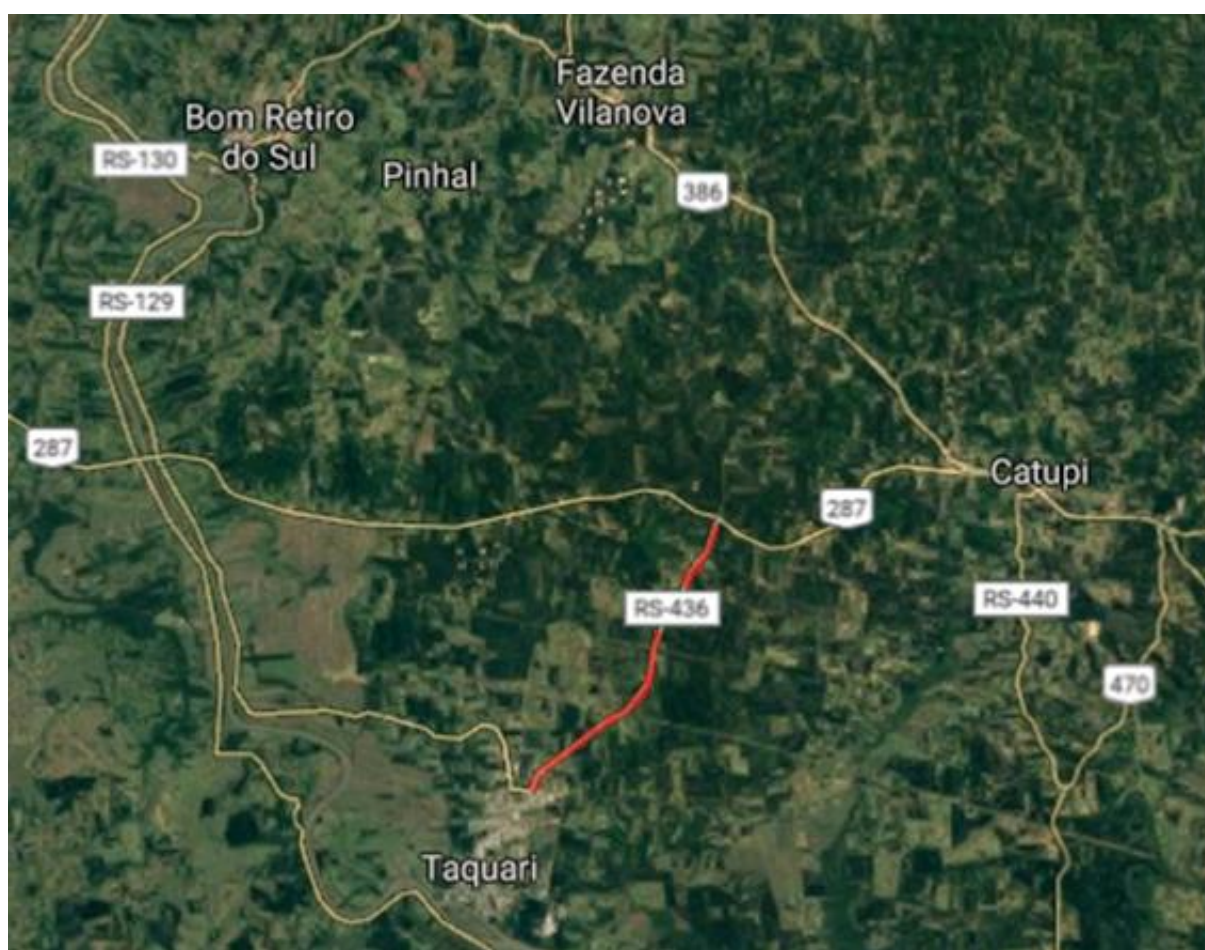
Fonte: Da autora (2018).

Devido à grande demanda de material utilizado para fazer os ensaios e aos resultados alcançados, foi necessário realizar uma segunda coleta para execução dos ensaios novamente. A mesma é descrita no item seguinte.

3.1.2 Material proveniente da coleta 2

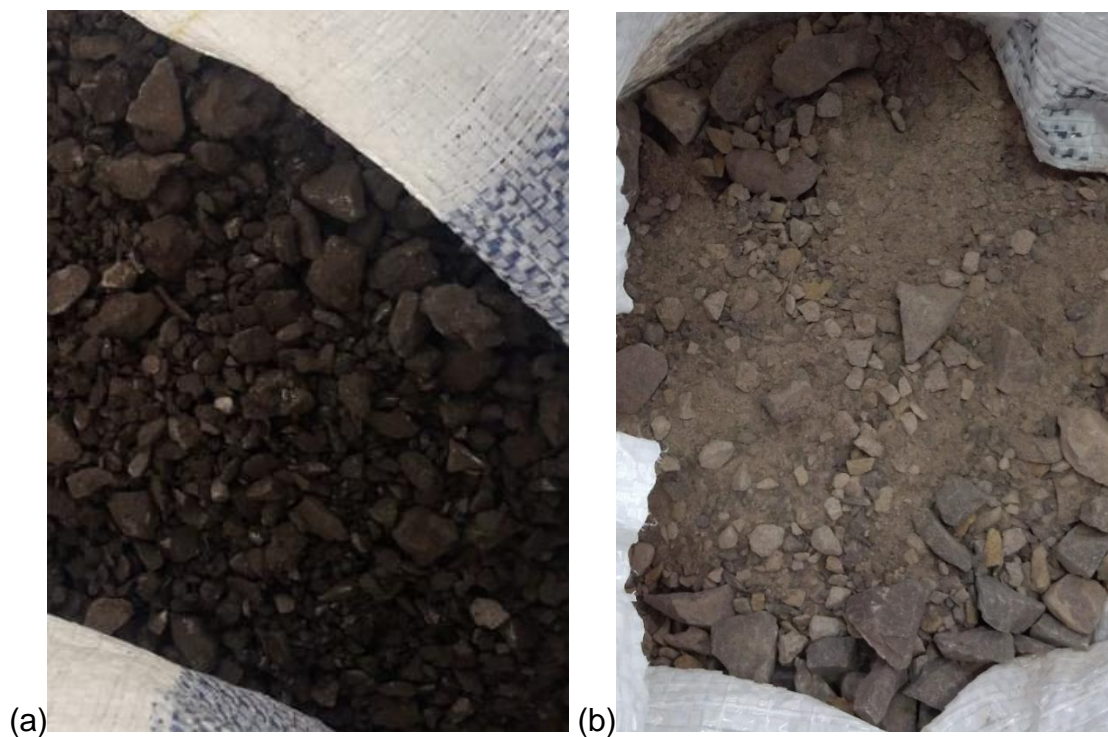
A segunda coleta foi realizada na rodovia RS 436, acesso à cidade de Taquari (FIGURA 8), com auxílio de uma fresadora Wirtgen, Modelo W100. O procedimento de recolhimento do material é diferente do apresentado anteriormente, já que nesta triturou-se o revestimento asfáltico em 5 cm de espessura e após recolheu-se amostra da brita graduada simples, separadamente (FIGURA 9).

Figura 8 – Mapa de localização da RSC – 436



Fonte: Google Maps (2018, texto digital).

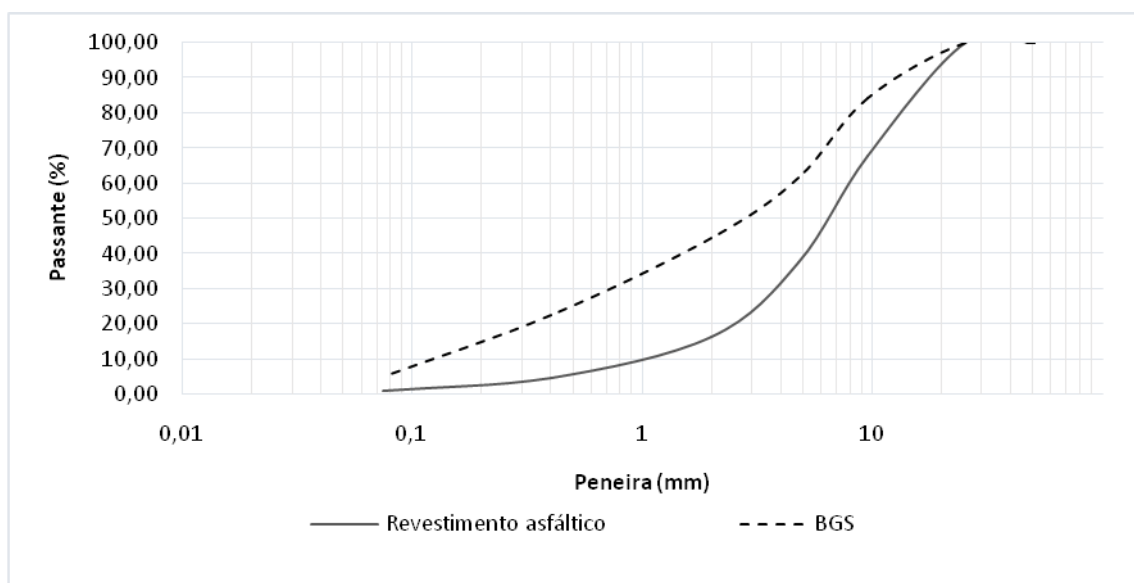
Figura 9 – Material coletado na RSC – 436 (a) revestimento asfáltico e (b) BGS



Fonte: Da autora (2018).

As curvas granulométricas dos materiais da coleta 2 são apresentados no Gráfico 4, onde apresentam-se separadamente o revestimento asfáltico e a base de BGS.

Gráfico 4 – Curvas granulométricas do material da segunda coleta



Fonte: Da autora (2018).

3.1.3 Cimento Portland

Como apresentado na Tabela 1, localizada no item 2.4.4, algumas normas técnicas nacionais fazem referência ao tipo de cimento que deve ser empregado na reciclagem de pavimento asfáltico, que são CP II E, CP II F e CP II Z, classe 32 e CPIV.

Este trabalho busca enquadrar-se e atender às diretrizes da DNIT-ES 167/2013. Deste modo, os tipos de cimento que foram utilizados nessa pesquisa foram o CP II F 32, o CP IV, em atenção à especificação citada. E o CP V ARI, pois entendeu-se relevante a análise do seu comportamento no emprego de pavimentos reciclados, já que este possui como propriedade a alta resistência inicial, característica importante para liberação imediata do tráfego. Na Tabela 3, são apresentadas as especificações técnicas dos cimentos empregados.

Tabela 3 – Características dos tipos de cimento empregados

Cimento	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
	Clínquer + sulfato de cálcio (gesso)	Escória granulada de alto-forno	Material pozzolânico	Material carbonático	
CP II F 32	94 - 90	0	0	6 a 10	NBR 11578
CP IV 32	85 - 45	0	15 a 50	0 a 5	NBR 5736
CP V ARI	100-95	0	0	0 a 5	NBR 5733

Fonte: Da autora (2018).

3.2 Métodos

Os métodos adotados para a caracterização do material, compactação, ensaio de resistência à compressão e ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram amparados pela especificação de serviço DNIT-ES 167 (DNIT, 2013).

3.2.1 Caracterização do material

A caracterização dos materiais foi realizada a partir de dois ensaios, que são análise granulométrica e teor de ligante asfáltico, descritas a seguir.

3.2.1.1 Análise da Granulometria

Para definição da granulometria da mistura foram realizados os ensaios de peneiramento de cada material separadamente, de acordo com as instruções e instrumentos descritos no método de ensaio DNER-ME 083 (DNIT, 1998a). Foram ensaiadas amostras de 10 kg para cada material.

O tamanho das amostras foi determinado a partir da dimensão máxima característica do material, definida pela abertura da peneira em que ficou acumulada, porcentagem igual ou inferior, a 5% em massa, que foi de 25 mm.

3.2.1.2 Definição do teor de ligante

O método para definição do teor de ligante asfáltico escolhido foi o extrator do refluxo (FIGURA 10a), ensaiado de acordo com o método de ensaio DAER-RS-EL 213 (DAER-RS, 2001). Salienta-se que o ligante das duas amostras é o Cimento asfáltico de Petróleo (CAP). Tratam-se, então, de ligantes asfálticos convencionais.

Figura 10 – Estrutura do aparelho (a) extrator por refluxo e (b) material da primeira coleta pronto para iniciar ensaio



Fonte: Da autora (2018).

A triagem do material para este ensaio ocorreu de duas formas distintas. Uma vez que o material proveniente da coleta 1 foi triturado em uma única camada, foi realizada uma seleção visual de torrões de revestimento asfáltico, aproximadamente 1,2 kg. E para a coleta 2, separou-se uma amostra de 1 kg do revestimento asfáltico, já que este apresenta os materiais separados.

Os ensaios foram feitos separadamente para cada coleta, e as etapas seguintes à separação dos materiais ocorrerem de forma idêntica. Foram confeccionados dois cones de papel filtro, os quais foram colocados dentro de outros cones metálicos. As amostras de material secas em estufa de aproximadamente 105°C foram destorroadas e divididas nos cones (FIGURA 10b), e estes foram colocados dentro da estrutura do extrator, nas quais ficaram até que o solvente que passava pelos cones tivesse coloração transparente.

Após a realização dos ensaios, atestou-se o teor de ligante asfáltico extraído do material fresado referente à Coleta 1, que foi igual a 6,84%, e para a Coleta 2 o teor foi de 4,10%. O baixo valor encontrado na coleta 1 é justificável pelo material já estar misturado com a base e ser difícil a sua separação para realização do ensaio.

3.2.2 Compactação

Para o ensaio de compactação, adotou-se a energia de compactação Modificada, que além de ser indicada na DNIT-ES 167/2013 (DNIT, 2013a), é sugerida por Fedrigo (2015), pois, a partir dos seus ensaios, o autor percebeu que tal energia propicia grande complemento na resistência e rigidez da mistura, o que permite usar menores teores de cimento. Ainda, a energia Modificada favorece a resistência em relação à água, ocasionando a redução da porosidade da camada.

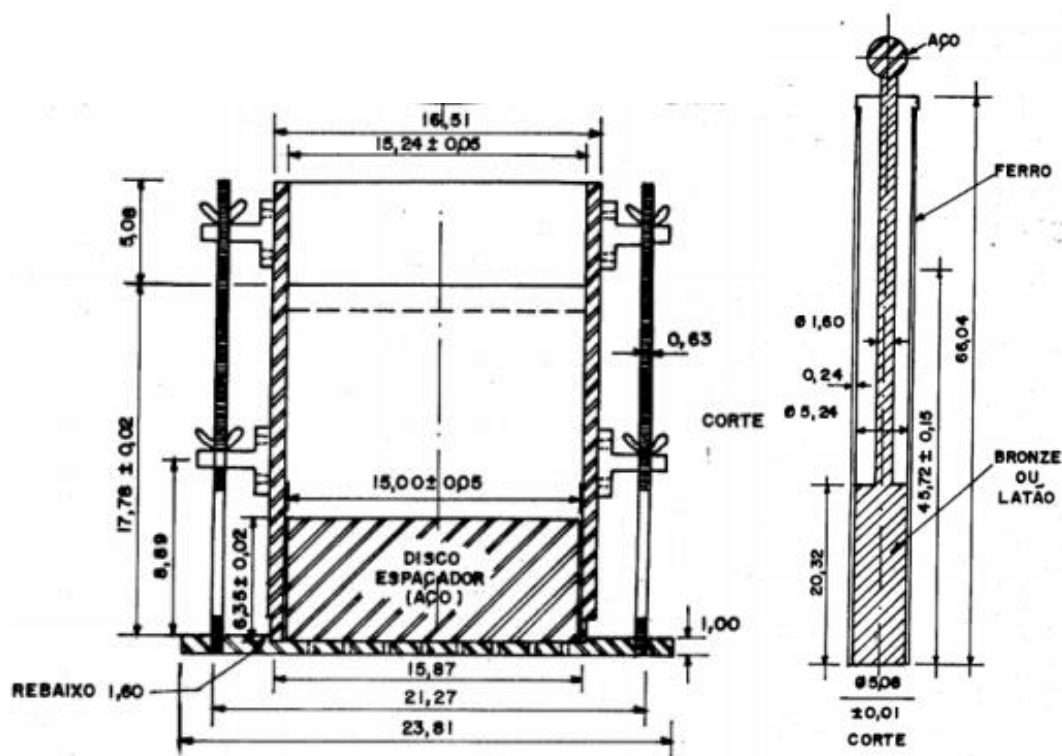
Os materiais foram colocados em uma bandeja onde ocorreu a mistura de maneira uniforme. Após, acrescentou-se a água para realização do primeiro ponto do ensaio, até que a mistura estivesse bem homogênea. A seguir, foram moldados os corpos de prova com 5 camadas iguais, aplicando 55 golpes em cada uma delas, o que equivale à energia Modificada.

O molde foi pesado vazio, ou seja, sem material e, mais uma vez, após cada moldagem, para que fosse possível definir os parâmetros. Na sequência, ele foi desmoldado e foram retiradas amostras de material das camadas centrais, que foram colocadas em cápsulas (de massa conhecida), pesadas e levadas à estufa com temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Depois da secagem, as amostras foram pesadas novamente.

Para obter a curva de compactação, esse procedimento foi realizado 5 vezes, sendo estes realizados sem reaproveitamento do material, adicionando mais água a cada ponto, como é especificado na norma. Espera-se, ao final de todas as etapas, determinar a umidade de cada ponto, além das massas específicas, sendo possível, a partir da curva de compactação, obter o valor do peso específico aparente seco máximo e do teor de umidade ótimo.

As dimensões do cilindro e soquete que foram utilizados nesse ensaio estão representadas na Figura 11. O soquete possui massa conhecida de 4,536 kg e altura de queda de 45,72 cm, conforme aparelhagem descrita na DNIT-ME 164 (DNIT, 2013b).

Figura 11 – Croqui do cilindro e soquete do ensaio de Proctor (dimensões em cm)



Fonte: DNIT-ME 164/2013 (2013b, p. 5-6).

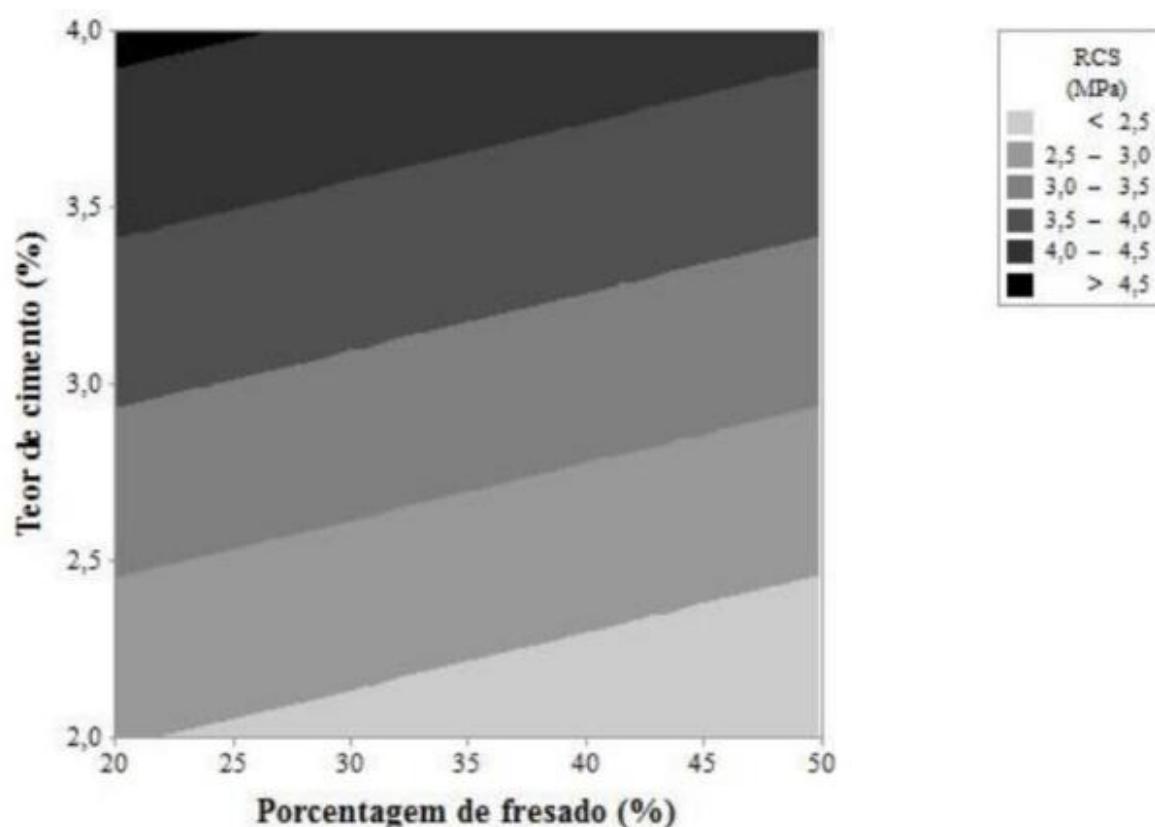
3.2.3 Teor de cimento

Fedrigio (2015) sugere que a utilização de teores de cimento seja de até 4%, já que esse teor propicia elevada resistência e rigidez. Através dos ensaios, o autor percebeu que o emprego mais elevado de teores aumenta significativamente a resistência contra água, mas isso pode agravar os efeitos da retração por secagem, aumentando o custo da obra.

O gráfico de contorno (FIGURA 12), apresentado por Fedrigio et al. (2017), mostra que utilizando até 20% do fresado de revestimento asfáltico é possível atingir, com 7 dias de cura, uma resistência à compressão simples entre 2,5 MPa e

3,0 MPa, empregando 2% a 2,5 % de cimento do tipo CP II E 32 e sendo que sua base é de brita graduada simples. Dessa forma, neste trabalho, foi adotado, de forma conservadora, o teor de 2,5% para todos os tipos de cimento utilizados, CP II F 32, CP IV 32 e CP V ARI.

Figura 12 – Contorno de RCS com 7 dias de cura para as misturas contendo BGS



Fonte: Fedrigo et al. (2017).

Ressalta-se que em sua pesquisa, Fedrigo et al. (2017) também apresenta gráfico de contorno para a resistência à tração por compressão diametral, mas o mesmo não é utilizado como referência para este trabalho, já que os corpos de prova utilizados naquela são de dimensão 10,2 x 6,5 cm, compactados em uma única camada (nas duas faces), diferente do método aqui adotado. Desta forma, entende-se que não é possível fazer comparações.

3.2.4 Moldagem dos corpos de prova

Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo que a moldagem foi efetuada em 5 camadas de 4 cm, com compactação equivalente à energia Modificada, ou seja, foram aplicados 41 golpes uniformemente distribuídos em cada camada, conforme é especificado DNIT-ES 167 (DNIT, 2013a).

A norma também delimita que sejam moldados pelo menos três corpos de prova para cada mistura analisada e para cada tempo de cura, que serão de 3 e 7 dias. Logo, para cada ensaio, foram moldados 36 corpos de prova, conforme Tabela 4, totalizando para os dois ensaios 72 corpos de prova.

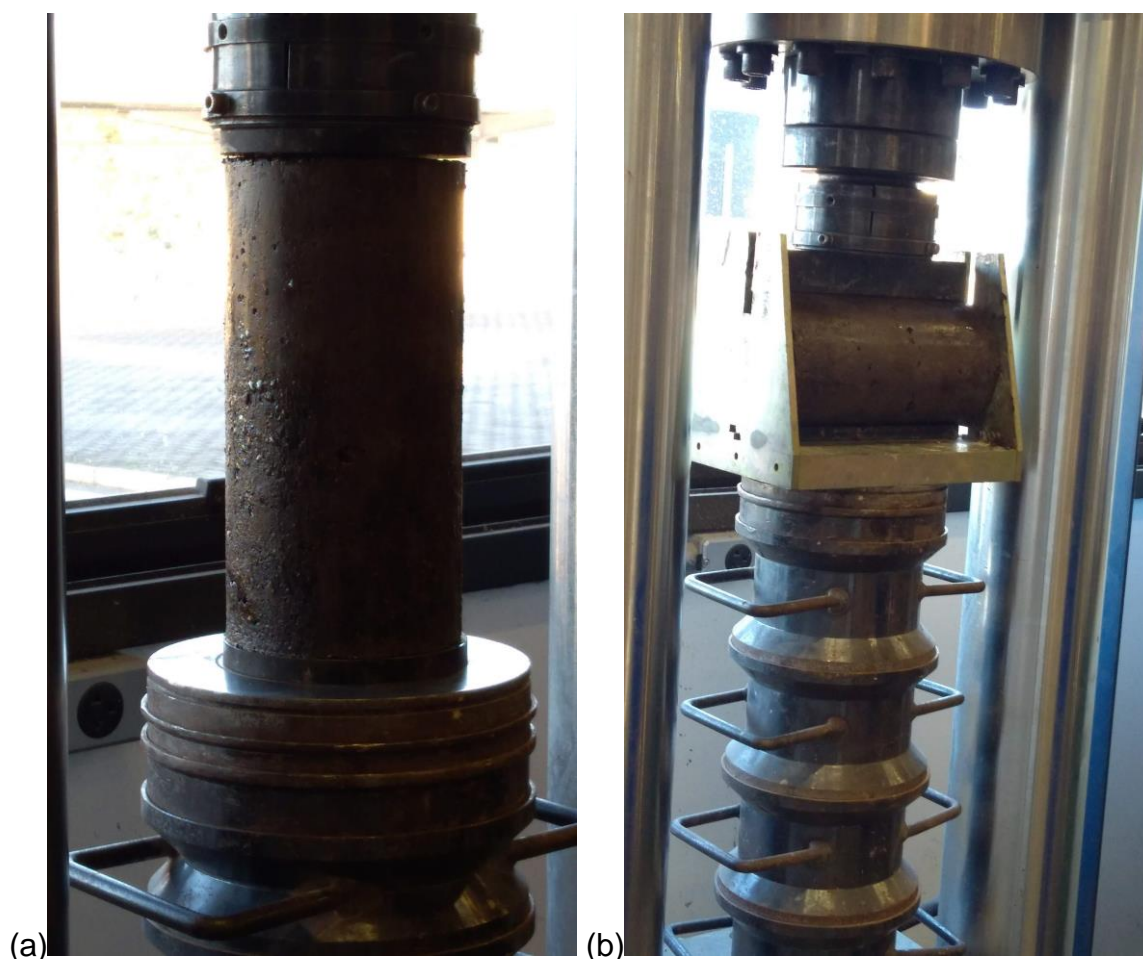
Tabela 4 – Corpos de prova para cada ensaio

Coleta	Misturas	Teor de cimento (%)	Tempo de cura (dias)	CPs / Tempo de cura	Número de CPs
COLETA 1	Material + CP II F 32	2,5	3 e 7	3	6
	Material + CP IV 32			3	6
	Material + CP V ARI			3	6
COLETA 2	Material + CP II F 32			3	6
	Material + CP IV 32			3	6
	Material + CP V ARI			3	6
				Total de CPs	36

Fonte: Da autora (2018).

Além disso, a cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida, cuja temperatura era próxima aos 23°C e a umidade relativa maior do que 90%. As rupturas dos corpos de prova foram realizadas em prensa hidráulica, conforme a Figura 13.

Figura 13 – Realização da (a) ruptura do corpo de prova à compressão simples e (b) à tração por compressão diametral



Fonte: Da autora (2018).

A norma DNIT-ES 167 (DNIT, 2013a) indica que, para os ensaios de resistência à compressão simples, devem ser seguidos os procedimentos da norma DNER-ME 201 (DNIT, 1994) (Solo cimento) e adotar velocidade de 0,14 MPa/s +/- 0,07 MPa/s. A norma DNER-ME 091 (DNIT, 1998b) (Concreto) indica valores entre 0,15 MPa/s e 0,35 MPa/s. No entanto a NBR 5739 (ABNT, 1994) (Concreto) prescreve como carga de ensaio de RCS os limites de 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s.

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, a norma DNIT-ES 167 (DNIT, 2013a) indica que a verificação deve seguir os procedimentos da norma DNER-ME 181 (DNER, 1994) (Solos estabilizado com cinza volante e cal hidratada) adotando velocidade de 0,50 MPa/s +/- 0,02 MPa/s, porém acredita-se que se trata de um engano, pois a mesma segue o dispositivo da NBR 7222 (ABNT,

2011) (Argamassa e concreto), onde a carga para ensaios de RCD é de 0,05 MPa/s +/- 0,02 MPa/s e não como consta na norma de solos.

Desse modo, optou-se por seguir as indicações das normas brasileiras anteriormente citadas, para os corpos de prova proveniente da coleta 1, utilizando as velocidades de 0,45 MPa/s e 0,05 MPa/s para os ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral, respectivamente. E para os corpos de prova do material proveniente da coleta 2, a taxa de carregamento aplicada na prensa hidráulica foi 0,25 MPa/s para ensaio de RCS, seguindo a sugestão de Fedrigo (2015), já que em sua pesquisa não apontou efeitos significativos entre as taxas de 0,14 MPa/s e 0,25 MPa/s, e para RCD manteve-se 0,05 MPa/s.

3.2.5 Resistência à compressão simples

Visando um bom comportamento das misturas, a DNIT-ES 167/2013 (DNIT, 2013a) tem como requisito que aos 7 dias de cura, os valores encontrados de RCS sejam entre 2,1 MPa a 2,5 MPa.

Foram consideradas as médias das resistências obtidas individualmente para a resistência da mistura, e as resistências individuais estão compreendidas no intervalo da média ± 1 desvio padrão. Dessa forma, a média foi calculada pela Equação 1, enquanto o desvio padrão pela Equação 2. Ainda, conforme Equação 3, foi determinado o coeficiente de variação.

$$RCS_{méd} = \frac{\sum RCS_{obtidos}}{n} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RCS_{obtidos} - RCS_{méd})^2}{n}} \quad (2)$$

$$CV = \frac{\sigma}{RCS_{méd}} \times 100 \quad (3)$$

3.2.6 Resistência à tração por compressão diametral

Do mesmo modo que a DNIT-ES 167 (DNIT, 2013a) delimita os valores a serem alcançados na resistência à compressão simples, existe a indicação da resistência à tração por compressão diametral, que é de 0,25 a 0,35 MPa, aos 7 dias de cura.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada através da Equação 4, a partir da carga de ruptura encontrada. Para esse ensaio, assim como proposto para o ensaio de RCS, foi considerada a média das resistências obtidas individualmente para a resistência da mistura, sendo que as resistências individuais estão compreendidas no intervalo da média ± 1 desvio padrão, e, ainda, a determinação do coeficiente de variação.

$$RCD = \frac{2F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (4)$$

Onde:

RCD – Resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F – Carga de ruptura, em N;

D – Diâmetro do corpo de prova, em cm;

H – Altura do corpo de prova, em cm.

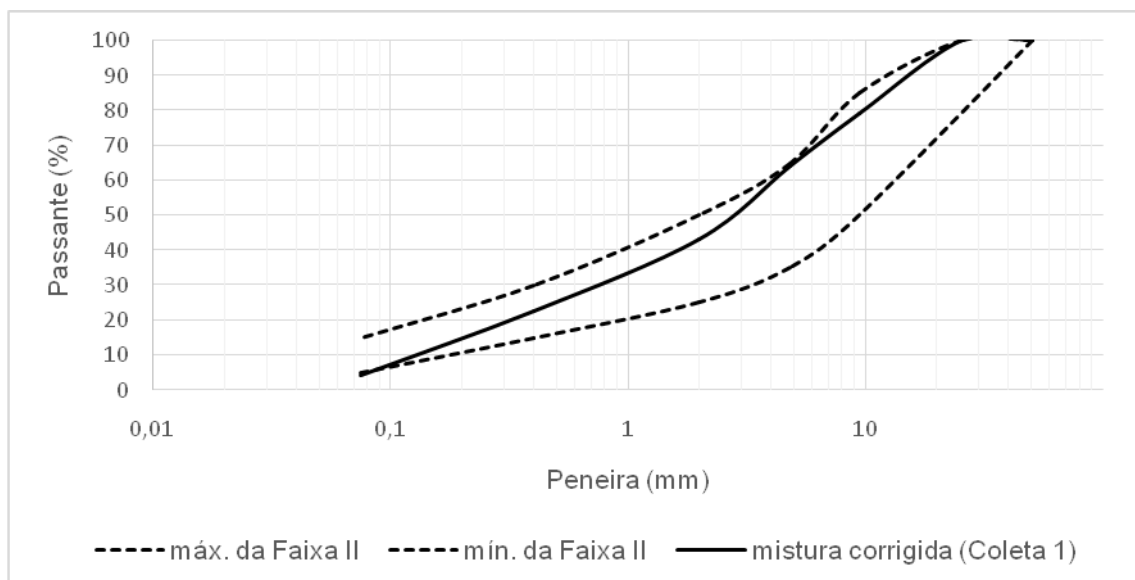
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos através dos ensaios.

4.1 Caracterização granulométrica das misturas

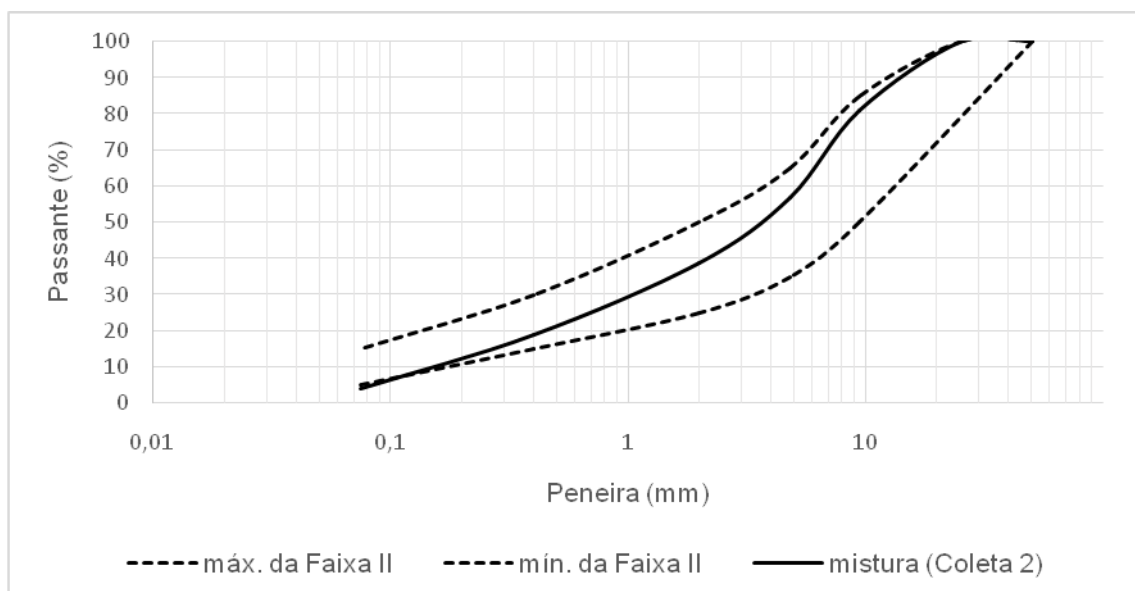
O DNIT (2013a) apresenta duas faixas granulométricas, conforme a Tabela 2, localizada no item 2.4.3, sendo que o material da presente pesquisa enquadrou-se melhor na Faixa II. Desse modo, ela foi utilizada como referência para este trabalho. Demonstra-se no Gráfico 5 (coleta 1) e Gráfico 6 (coleta 2), os limites granulométricos da faixa II proposta pelo DNIT (2013a), comprovando que as misturas se encaixam na mesma. Ressaltando-se que, a partir desse item, sempre que for citada a coleta 1, estará se referindo ao material, oriundo de tal coleta com a granulometria corrigida.

Gráfico 5 – Curvas granulométricas da mistura corrigida enquadrada aos limites DNIT (coleta 1)



Fonte: Da autora (2018)

Gráfico 6 – Curvas granulométricas da mistura enquadrada aos limites DNIT (coleta 2)

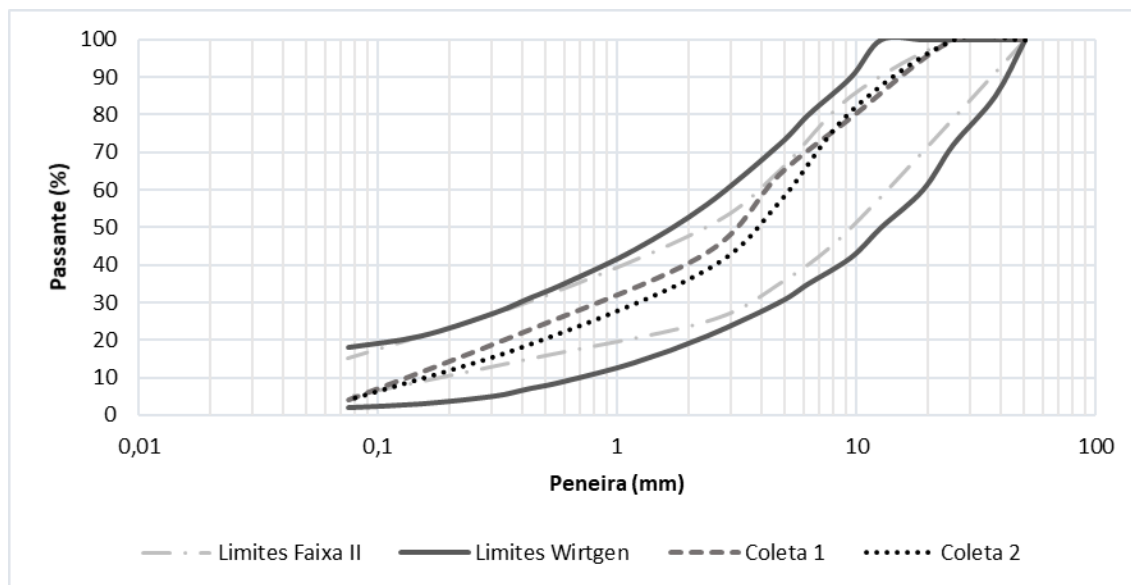


Fonte: Da autora (2018).

Conforme pode-se observar nos Gráficos 5 e 6, a distribuição granulométrica das misturas estudadas tem como característica ficarem mais próximas do limite inferior da faixa II para as menores dimensões e mais próximas do limite superior para as maiores dimensões dos agregados.

Também considera-se importante apresentar as misturas enquadradas na faixa da Wirtgen (2012), conforme o Gráfico 7, já que a mesma foi utilizada como referência na pesquisa de Fedrigo et al. (2017). Acredita-se que esse parâmetro pode acarretar diferença de resistência atingida pelas amostras.

Gráfico 7 – Curvas granulométricas das Coletas 1 e 2 enquadradas aos limites Faixa II e Wirtgen



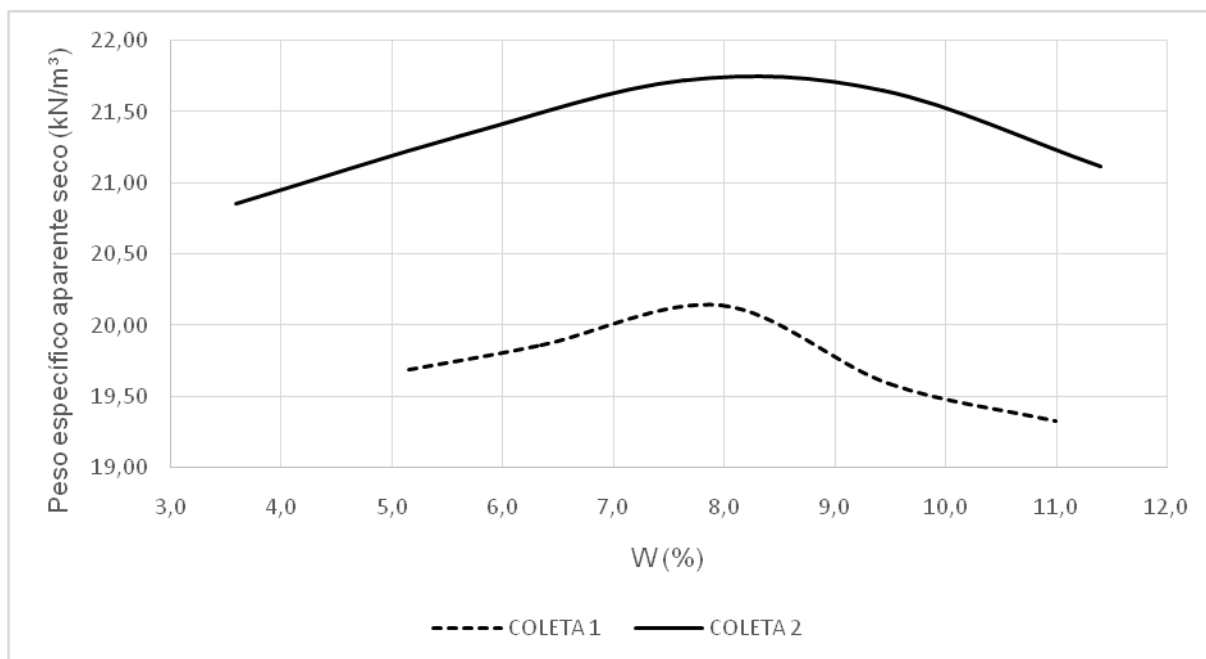
Fonte: Da autora (2018).

4.2 Compactação

Devido à escassez do material necessário para essa pesquisa, optou-se por fazer apenas dois ensaios de compactação, sendo ensaiados somente os materiais provenientes das coletas 1 e 2, sem adição de cimento. As porcentagens de umidade ótima apresentadas por Fedrigo (2015), para materiais com diferentes teores de cimento e com a energia de compactação modificada, mesmo com proporções diferentes de fresado, apresentaram valores de umidade ótima entre 7,1% e 8,2%, ou seja, uma pequena variação.

A partir da realização dos ensaios, foi possível obter as curvas de compactação das duas misturas estudadas (GRÁFICO 8). A Tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de compactação para as duas misturas.

Gráfico 8 – Curvas de compactação das misturas



Fonte: Da autora (2018).

Tabela 5 – resultados do ensaio de compactação para as duas misturas.

Mistura	Peso específico aparente seco máximo (kN/m³)	Umidade ótima (%)
Coleta 1	20,15	7,9
Coleta 2	21,75	8,2

Fonte: Da autora (2018).

Conforme a Tabela 5, observou-se que o material proveniente da coleta 2 é mais denso que o da coleta 1, por consequência, apresentou um teor de umidade maior.

Ainda, de acordo com o que foi explanado no item 3.1.1, referente à espessura de fresagem de 20 cm, onde 4 cm seria revestimento e 16 cm de BGS, correspondendo por tanto a 20% e 80%, respectivamente, não se pode dizer que as porcentagens de espessuras sejam equivalentes em massa, já que não foram realizados ensaios de densidade e nem foram realizadas sondagens para comprovação de que essa espessura era uniforme na área fresada. Portanto, se

essa for verídica, o teor de fresado na mistura da coleta 1 seria inferior a 20%, já que foi adicionado 30% em massa de material virgem.

4.3 Resistência à compressão simples

A seguir são apresentadas a Tabela 6 e Tabela 7, que mostram todos os valores individuais de resistência à compressão simples encontrados para a coleta 1 e coleta 2, respectivamente. Nas mesmas tabelas, também são apresentados a média (Equação 1), o desvio padrão (Equação 2) e o coeficiente de variação (Equação 3).

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de RCS da coleta 1

Cimento	Idade	Resistências (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
CP II F 32	3 DIAS	1,21	1,25	0,0404	3,24
		1,29			
		1,24			
	7 DIAS	1,42	1,41	0,0141	1,00
		1,40			
		1,49			
CP IV 32	3 DIAS	0,92	0,94	0,0200	2,13
		0,96			
		0,94			
	7 DIAS	1,18	1,27	0,0141	1,11
		1,28			
		1,26			
CP V ARI	3 DIAS	1,04	1,12	0,0802	7,14
		1,20			
		1,13			
	7 DIAS	1,43	1,40	0,0361	2,58
		1,36			
		1,41			

Fonte: Da autora (2018).

Na Tabela 6, são indicados os corpos de prova que não atenderam ao critério de validação da média ± 1 desvio padrão e por isso foram desconsiderados para cálculo da média apresentada. Estes valores estão taxados na tabela. Com os valores considerados válidos foram calculados a RCS média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada cimento e tempo de cura de 3 dias e 7 dias.

Pode-se observar que, no geral, as amostras possuem coeficiente de variação baixo, com valor máximo de 7,14% na Coleta 1. Os valores de CV encontrados para as amostras da coleta 1 são bem inferiores a 25%, que é a porcentagem máxima para amostras que são classificadas como homogêneas. Portanto, isso demonstra que os corpos de prova foram moldados satisfatoriamente.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de RCS da coleta 2.

Cimento	Idade	Resistências (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
CP II F 32	3 DIAS	1,12	1,18	0,0778	6,62
		1,23			
		1,47			
	7 DIAS	1,59	1,58	0,0212	1,35
		1,56			
		1,67			
CP IV 32	3 DIAS	1,28	1,49	0,0000	0,00
		1,49			
		1,49			
	7 DIAS	1,40	1,46	0,0603	4,14
		1,45			
		1,52			
CP V ARI	3 DIAS	0,98	1,00	0,0212	2,13
		1,08			
		1,01			
	7 DIAS	1,74	1,76	0,0212	1,21
		1,77			
		1,86			

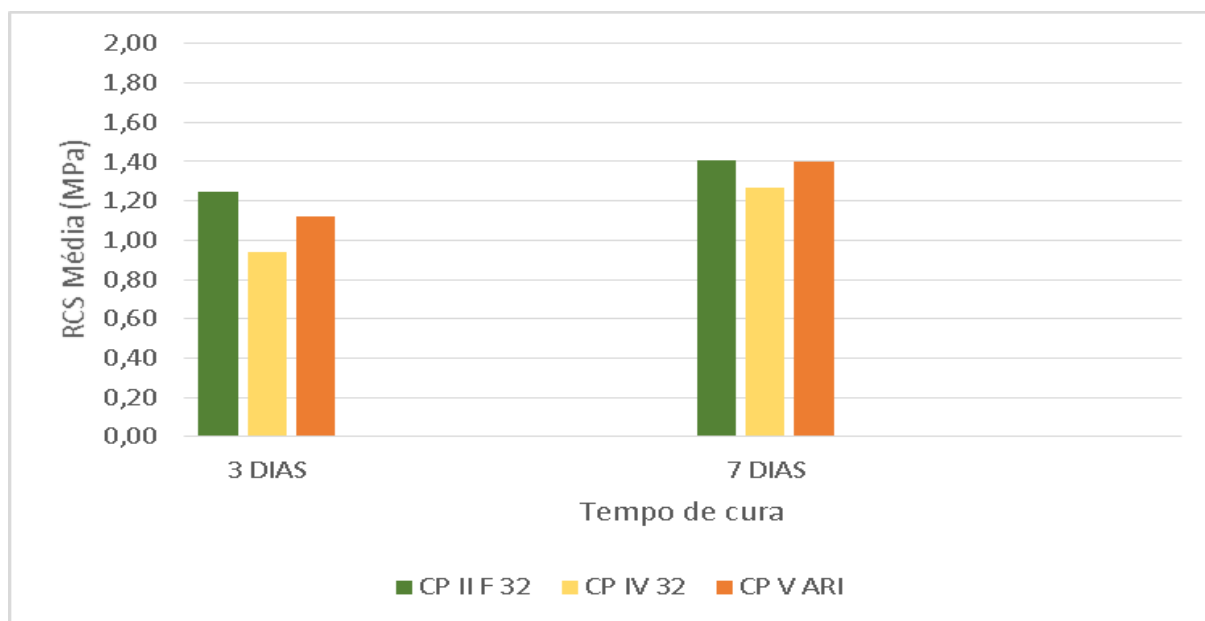
Fonte: Da autora (2018).

Na Tabela 7, também são taxados os valores dos corpos de prova que não atenderam ao critério de validação. A partir dos valores considerados válidos foram calculados a RCS média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada cimento e tempo de cura de 3 dias e 7 dias.

Observa-se que as amostras possuem coeficiente de variação baixo, com valor máximo de 6,62% na Coleta 2. Portanto, também indicam que os corpos de prova das amostras da coleta 2 foram moldados de maneira satisfatória.

Nos Gráficos 9 e 10, apresentam-se as resistências médias à compressão simples para as coletas 1 e 2, respectivamente. Nos mesmos gráficos, também é possível comparar a diferença de resistência para os períodos de cura de 3 dias e 7 dias.

Gráfico 9 – Gráfico da média dos resultados da coleta 1



Fonte: Da autora (2018).

Através do Gráfico 9, é possível observar a RCS média dos resultados alcançados por cada tipo de cimento no terceiro e sétimo dia de cura para as misturas da coleta 1. Os valores de RCS encontrados foram inferiores ao exigido pela norma DNIT-ES 167 (DNIT, 2013a), que especifica o valor mínimo, aos 7 dias de cura, de 2,1 MPa. Também destaca-se que os valores encontrados estão fora da faixa prevista pelo método de dosagem apresentado por Fedrigo et al. (2017), que serviu de base para escolha do teor de cimento desta pesquisa.

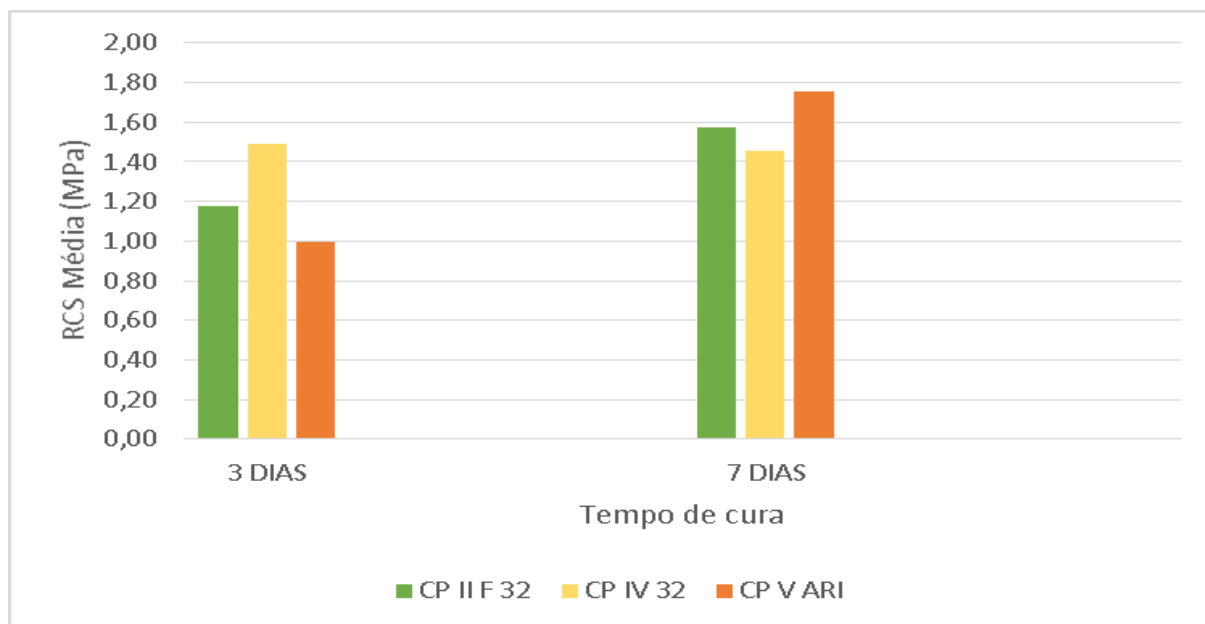
Os resultados apresentados no Gráfico 9 mostraram que a mistura com CP II F 32 apresentou RCS média aos 3 dias de cura de 1,25 MPa, e para os 7 dias de cura o valor de 1,41 MPa, o que representa um aumento de aproximadamente 13%. Já a mistura com o CP IV 32 apresentou RCS média aos 3 dias de 0,94 MPa, e de 1,27 MPa para 7 dias de cura, o que representa um aumento um pouco superior a 35%. Por fim, a mistura contendo o CP V ARI apresentou 1,12 MPa e 1,40 MPa, aos 3 dias e 7 dias de cura, respectivamente, representando um aumento de 25%.

Os corpos de prova constituídos pelo CP II F 32, que possui em sua composição maior quantidade de material carbonático, que funcionam como lubrificante, tornando as misturas trabalháveis por mais tempo, apresentaram resultados superiores ao CP IV 32, como era de se esperar, já que de acordo com a

literatura, cimentos CP IV que apresentam alto teor de pozolana possuem como característica o ganho de resistência lento, atingindo o ápice em idades mais avançadas.

No entanto, o CP V ARI, que se esperava que tivesse resistência mais alta, devido ao grande percentual de clínquer+gesso, que acelera o processo de endurecimento da pasta, atingindo altas resistências ainda nas primeiras idades de cura, também apresentou menor resistência que o CP II F 32 para os 3 dias de cura, e quase igualou a resistência para os 7 dias.

Gráfico 10 – Gráfico da média dos resultados da coleta 2



Fonte: Da autora (2018).

Os valores médios dos resultados de RCS, para cada tipo de cimento no terceiro e sétimo dia de cura para as misturas da coleta 2, são apresentados no Gráfico 10. Do mesmo modo que os resultados da Coleta 1, os da Coleta 2 também foram inferiores ao exigido pela norma DNIT-ES 167 (DNIT, 2013). E consequentemente, também apresentam valores fora da faixa prevista por Fedrigo et al. (2017).

O Gráfico 10 mostra que a mistura com CP II F 32 apresentou como resultado médio os valores de 1,18 MPa e 1,58 MPa, aos 3 dias e 7 dias de cura, respectivamente, representando um aumento de quase 34%. A mistura contendo CP

IV 32 apresentou RCS média aos 3 dias de cura de 1,49 MPa e para os 7 dias de cura o valor de 1,46 MPa, o que representa um decréscimo de aproximadamente 1,36%. Por fim, a mistura com o CP V ARI apresentou RCS média aos 3 dias de 1,00 MPa, e de 1,76 MPa para 7 dias de cura, o que representa um aumento um pouco superior a 76%.

As amostras constituídas pelo CP II F 32 aos 3 dias de cura apresentaram resultados inferiores ao CP IV 32, no entanto aos 7 dias de cura apresentou valor superior ao mesmo. O CP V ARI, que apresentava o pior resultado no terceiro dia de cura, ao sétimo dia apresentou o melhor resultado quando comparado às amostras dos outros dois cimentos.

Pode-se reparar que os resultados alcançados na coleta 1 foram levemente inferiores aos resultados encontrados na coleta 2, aos 7 dias de cura. O CP II F 32 apresentou 1,41 MPa e 1,58 MPa, correspondendo à coleta 1 e coleta 2, respectivamente. Já a mistura que era constituída pelo CP IV 32, na coleta 1 apresentou resultado de 1,27 MPa e para a coleta 2 o resultado foi de 1,46 MPa. Finalmente, o resultado do CP V ARI é de 1,40 MPa para a coleta 1 e 1,76 MPa para coleta 2. Salienta-se, novamente, que todos os resultados foram abaixo do previsto.

4.4 Resistência à tração por compressão diametral

Em seguida são elencados todos os valores individuais de resistência à compressão simples encontrados para a coleta 1 (TABELA 8) e coleta 2 (TABELA 9). Nas Tabelas 8 e 9, também são apresentados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação, calculados conforme a Equação 1, Equação 2 e Equação 3, respectivamente.

Tabela 8 – resultados dos ensaios de RCD da primeira coleta

Cimento	Idade	Resistências (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
CP II F 32	3 DIAS	0,24	0,21	0,0019	0,91
		0,21			
		0,21			
	7 DIAS	0,30	0,31	0,0068	2,22
		0,30			
		0,31			
CP IV 32	3 DIAS	0,17	0,17	0,0082	4,90
		0,18			
		0,16			
	7 DIAS	0,21	0,22	0,0047	2,17
		0,22			
		0,22			
CP V ARI	3 DIAS	0,21	0,21	0,0097	4,62
		0,20			
		0,22			
	7 DIAS	0,23	0,23	0,0027	1,15
		0,24			
		0,23			

Fonte: Da autora (2018).

Apenas um corpo de prova foi desconsiderado para cálculo da média apresentada, pois não atendeu ao critério de validação da média ± 1 desvio padrão – o mesmo está taxado na Tabela 8. A partir dos valores considerados válidos é que foram calculados a RCD média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada tempo de cura de 3 e 7 dias e respectivo cimento.

Sem pormenorizar, observa-se que as amostras possuem coeficiente de variação bem abaixo do limite máximo de 25% em que caracteriza as amostras como homogêneas. O valor máximo de CV na coleta 1 para o ensaio de RCD é de 4,90%, consequentemente, isso indica que os corpos de prova foram moldados de modo aceitável.

Tabela 9 – resultados dos ensaios de RCD da segunda coleta

Cimento	Idade	Resistências (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
CP II F 32	3 DIAS	0,16	0,18	0,0301	17,07
		0,15			
		0,21			
	7 DIAS	0,18	0,18	0,0095	5,16
		0,29			
		0,19			

Continua...

(Continuação)

Cimento	Idade	Resistências (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
CP IV 32	3 DIAS	0,19	0,22	0,0216	10,00
		0,24			
		0,22			
	7 DIAS	0,20	0,20	0,0027	1,33
		0,20			
		0,20			
CP V ARI	3 DIAS	0,16	0,15	0,0056	3,63
		0,15			
		0,16			
	7 DIAS	0,33	0,31	0,0229	7,37
		0,29			
		0,31			

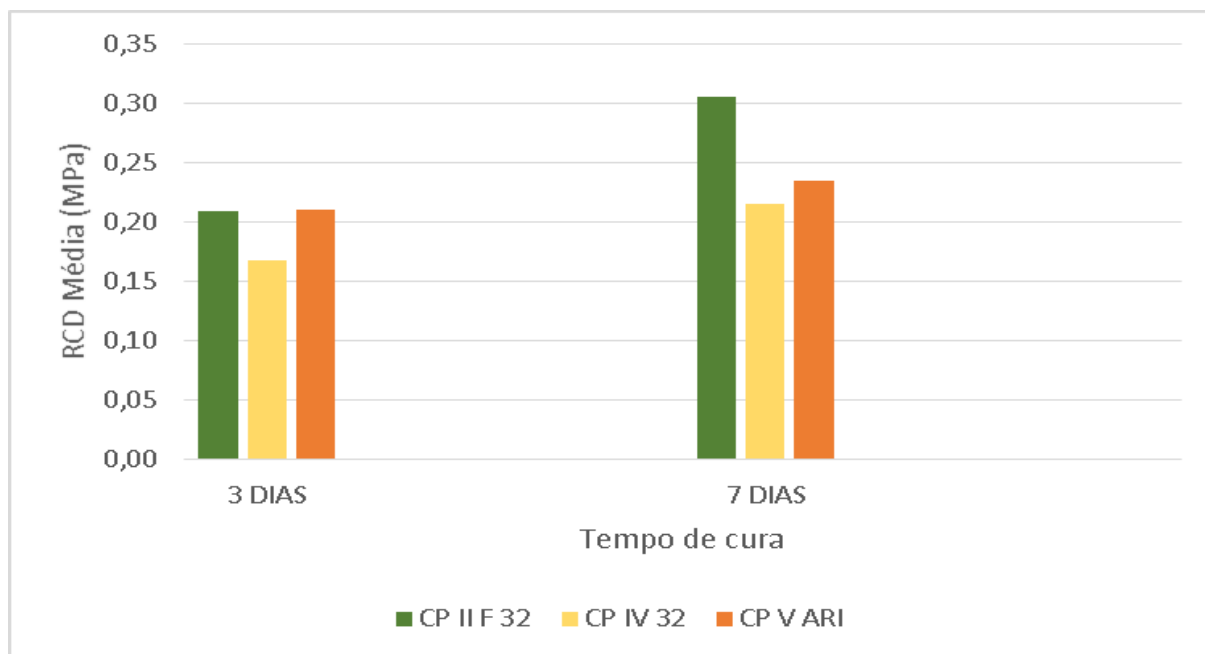
Fonte: Da autora (2018).

Na Tabela 9, também é taxado apenas um valor, cuja amostra não atendeu ao critério de validação. E assim como para a coleta 1, a partir dos valores considerados válidos foram calculados a RCD média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada tempo de cura de 3 dias e 7 dias e cimento.

Expõem-se, no geral, que as amostras possuem coeficiente de variação baixo, com valor máximo de 17,07% na Coleta 2. Os valores de CV encontrados para as amostras da coleta 2 também indicaram que os corpos de prova foram moldados satisfatoriamente.

A seguir apresentam-se gráficos contendo as resistências médias à tração por compressão diametral para as coletas 1 (GRÁFICO 11) e 2 (GRÁFICO 12). Nos mesmos gráficos, também é possível comparar a diferença de resistência para os períodos de cura de 3 dias e 7 dias.

Gráfico 11 – Gráfico da média dos resultados da coleta 1



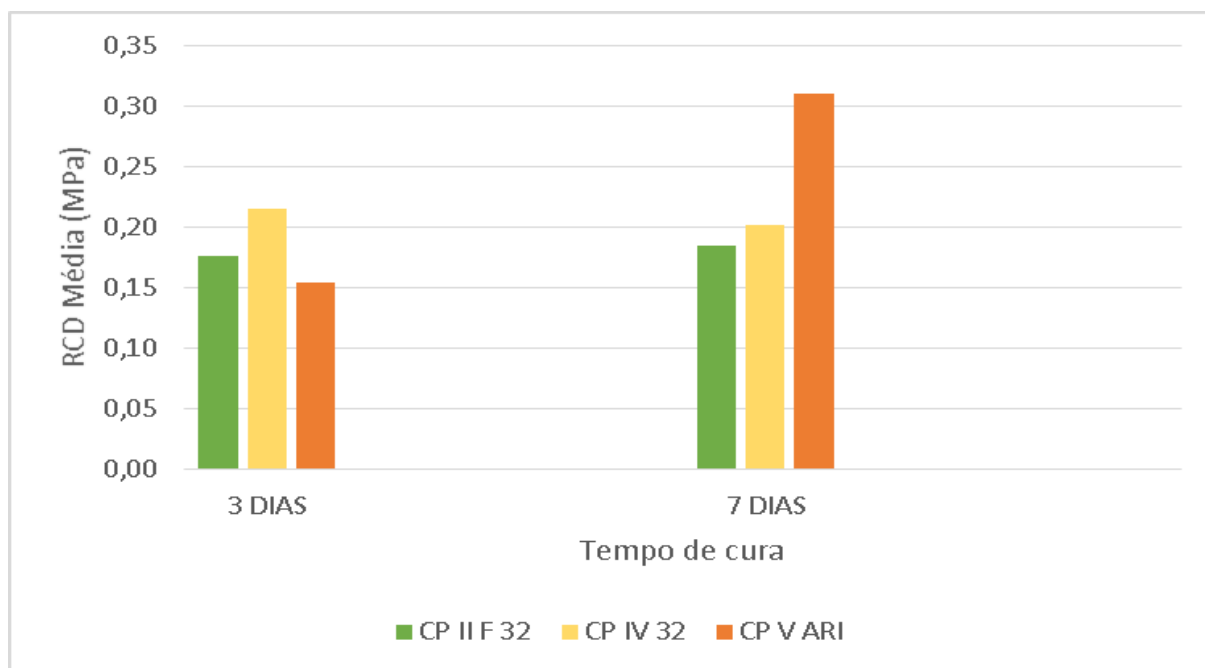
Fonte: Da autora (2018).

Por meio do Gráfico 11, é possível observar a RCD média dos resultados alcançados para cada tipo de cimento conforme o tempo de cura, de 3 dias e 7 dias, para as misturas da coleta 2. Apenas o corpo de prova composto por CP II F 32, que atingiu 0,31 MPa, apresentou valor de RCD média superior ao exigido pela norma 167 (DNIT, 2013a), que especifica o valor mínimo, aos 7 dias de cura, de 0,25 MPa.

Os resultados lançados no Gráfico 11 revelam que a mistura com CP II F 32 apresentou RCD média aos 3 dias de cura de 0,21 MPa e para os 7 dias de cura o valor de 0,31 MPa, o que representa um aumento de aproximadamente 48%. Já a mistura com o CP IV 32 apresentou um aumento um pouco superior a 29%, com RCS média aos 3 dias de 0,17 MPa, e de 0,22 MPa para 7 dias de cura. Por fim, a mistura contendo o CP V ARI teve um aumento de 9,5%, sendo a RCD média de 0,21 MPa e 0,23 MPa, aos 3 dias e 7 dias de cura, respectivamente.

Assim como nos valores de RCS para a coleta 1, os CPs constituídos pelo CP II F 32 apresentaram resultados superiores ao CP IV 32, como era de se esperar. No entanto, o CP V ARI, que se esperava que tivesse resistência mais alta, também apresentou menor resistência que o CP II F 32.

Gráfico 12 – Gráfico da média dos resultados da coleta 2



Fonte: Da autora (2018).

No Gráfico 12, é possível observar a RCD média dos resultados alcançados por cada tipo de cimento no terceiro e sétimo dia de cura para as misturas da coleta 2. E assim como para coleta 1, apenas uma amostra atingiu o valor mínimo de RCD determinado pela norma DNIT-ES 167 (DNIT, 2013a), que foi o corpo de prova composto pelo CP V ARI, o qual alcançou o valor de 0,31 MPa.

A partir dos resultados apresentados no Gráfico 12, pode-se observar que a mistura com CP II F 32 apresentou RCD média aos 3 dias e 7 dias de cura de 0,18 MPa, ou seja, apresentou constância. Já a mistura com o CP IV 32 apresentou RCS média aos 3 dias de 0,22 MPa, e de 0,20 MPa para 7 dias de cura, o que representa um decréscimo de pouco mais de 9%. Por fim, a única mistura que apresentou aumento de RCD média na coleta 2 foi a que era composta pelo CP V ARI, a qual apresentou 0,15 MPa aos 3 dias de cura e 0,31 MPa aos 7 dias de cura, representando um aumento de pouco mais de 106%.

Dessa vez, os corpos de prova constituídos pelo CP II F 32 não apresentaram resultados superiores ao CP IV 32, como era de se esperar. O CP V ARI, que se esperava que tivesse resistência mais alta, apresentou resistência inferior aos outros

dois tipos de cimento para os 3 dias de cura, no entanto, os superou aos 7 dias de cura.

Pode-se reparar que, diferente do que foi constatado no ensaio de RCS, no qual os resultados alcançados pela coleta 1 foram levemente inferiores a coleta 2, para o ensaio de RCD, a coleta 1 apresentou, na maioria dos resultados, valores levemente superiores que a coleta 2, aos 7 dias de cura.

O CP II F 32 apresentou RCD média de 0,31 MPa e 0,18 MPa, correspondendo à coleta 1 e coleta 2, respectivamente. Já a mistura que era constituída pelo CP IV 32, na coleta 1 apresentou resultado de 0,22 MPa e para a coleta 2 o resultado foi de 0,20 MPa. Por fim, o único resultado que apresentou relação inversa foi do corpo de prova constituído pelo CP V ARI, no qual o valor para a coleta 1 é de 0,23 MPa e 0,31 MPa para coleta 2. Pode-se observar então que as misturas que atingiram o valor mínimo aos 7 dias de cura foram distintas.

5 CONCLUSÃO

Entende-se que o objetivo dessa pesquisa foi plenamente atingido, visto que o objetivo geral era analisar, por meio de ensaios laboratoriais, a resistência de mistura recicladas para diferentes tipos de cimento Portland, atendendo também aos objetivos específicos propostos.

Quanto à caracterização do material, através do teor de ligante foram aferidos os resultados de 6,84% para coleta 1 e 4,1 % para coleta 2, constatando coerência com outros autores. Sobre a análise granulométrica, as duas coletas foram similares, pois ambas têm como característica curvas mais próximas do limite inferior da faixa II para as menores dimensões e mais próximas do limite superior para as maiores dimensões dos agregados, enquadradas também nos limites da Wirtgen.

Em relação ao comportamento dos tipos de cimento nos valores de RCS média, aos 7 dias de cura, as misturas da coleta 2 apresentaram melhor resultado em relação à coleta 1. As amostras compostas pelo CP IV 32 apresentaram o pior resultado nas duas misturas analisadas. O melhor resultado de RCS média foi de 1,76 MPa da amostra contendo CP V ARI, seguida de 1,58 MPa da mistura constituída pelo CP II F 32, os dois referentes à coleta 2.

Tanto a amostra contendo CP II F 32 da coleta 1 quanto a amostra do CP V ARI da coleta 2 atingiram 0,31 MPa, sendo este o valor mais alto atingido nessa pesquisa para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, aos 7 dias de cura.

O valor mínimo da RCS de acordo com a norma DNIT-ES 167 (DNIT, 2013) não foi atingindo, desse modo, não foi possível validar o método de dosagem sugerido por Fedrigo et al. (2017), pois os resultados de resistência à compressão simples deram abaixo do esperado. No entanto, atingiu-se a resistência à tração por compressão diametral mínima estipulada na norma DNIT-ES 167 (DNIT, 2013a). Salienta-se que o método de dosagem de Fedrigo et al. (2017), para a RCD, não foi comparada nesta pesquisa, pois o mesmo foi elaborado de forma distinta, conforme explicado no Item 3.2.3.

Ao tentar entender os baixos valores de resistência encontrados, recorreu-se novamente à literatura, na qual encontrou-se o trabalho Trichês et al. (2013), que também apresentam em condições similares, valores de 1,24 MPa para teor de cimento de 2 % e 1,74 MPa para o teor de cimento de 3%.

Também, ao observar o material fresado apresentado por Fedrigo (2015) que serviu de base para o método de dosagem proposto por Fedrigo et al. (2017), constata-se que o mesmo não apresenta coloração preta, que seria característica de material proveniente do revestimento asfáltico que ainda mantém suas características de quando era novo. Desse modo, é possível que a diferença de resistência tenha ocorrido devido ao ligante asfáltico desta pesquisa ainda apresentar características de novo, ou seja, ainda era coesivo e talvez o da pesquisa de Fedrigo et al. (2017) não fosse. Isso pode ter feito com que este ligante que fica ao redor do agregado reduza a aderência do cimento, e até os efeitos e, por consequência, a baixa resistência obtida nos ensaios em relação ao esperado.

Com base nas conclusões relatadas, mesmo não atingindo as resistências à compressão simples esperadas, foi possível fazer uma breve análise a respeito dos tipos de cimento empregados. Quanto a mistura constituída pelo CP V ARI, apresentou o maior ganho de resistência entre o terceiro e sétimo dia de cura, confirmou-se a tese de que quanto mais teor de clínquer+gesso – ou seja, mais pureza – mais rapidamente acontece o processo de endurecimento da pasta. Desse modo, elevam o calor de hidratação, reduzindo o tempo de pega, já que atingem logo no primeiro mês o máximo de sua resistência, característica que propicia efeitos de retração. Quanto à mistura contendo o CP IV 32, este mostrou um comportamento linear, reforçando a principal característica do cimento que possui

alta porcentagem de material pozolânico, que é o ganho de resistência lento. Quanto a mistura integrada pelo CP II F 32, o mesmo apresentou altas resistências, sem apresentar altas taxas de variação entre o terceiro e o sétimo dia. Temos aqui uma boa característica para a pronta liberação do tráfego.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7. ed. São Paulo: ABPC, 2002. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRO DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ARANHA, Ana Luisa. **Avaliação laboratorial e em campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-26072013-114250/pt-br.php>>. Acesso em: 5 out. 2017.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION (ARRA). **Basic Asphalt Recycling Manual**. Annapolis: Maryland, 2001. Disponível: <<http://www.dot.state.mn.us/materials/pvmtdesign/docs/BasicAsphaltRecyclingManual.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2017.

AUSTROADS. **Mix design for stabilised pavement materials**: Austroads Publication APT16. Sydney: Austroads, 2002.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica**: Materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção 1**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica**: Formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/ ABEDA, 2008.

BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luis Picado. **Pavimentos Rodoviários**. Coimbra: Almedina, 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Transporte rodoviário**: Desempenho do setor, infraestrutura e investimentos. Brasília: CNT, 2017.

Disponível em:

<http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Estudos%20CNT/estudo_transporte_rodoviario_infraestrutura.pdf>. Acesso em: 2 out. 2017

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGENS DO RIO GRANDE DO SUL (DAER-RS). **DAER-RS-EL 213**: Determinação do teor de asfalto de mistura betuminosa utilizando o extrator por refluxo. Porto Alegre: DAER-RS, 2001.

Disponível em: <<http://www.daer.rs.gov.br/upload/arquivos/201607/27154706-manual-de-ensaios-vol-ii.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DE SANTA CATARINA (DEINFRA-SC). **DEINFRA-SC-ES-P 09**: Pavimentação – Especificação de Serviço: Reciclagem profunda de pavimento com adição de cimento Portland. Florianópolis: DEINFRA, 2012. Disponível em:

<<http://www.deinfra.sc.gov.br/webdocs/deinfra/docs/doc-tecnicos/engenharia-rodoviaria/ES-P-09-16%20-%20Reciclagem%20Profunda.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ (DER-PR). **DER/PR ES-P 33**: Pavimentação: Reciclagem de pavimento *in situ* com adição de cimento. Curitiba: DER-PR, 2005. Disponível em:

<http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/PDF/pdf_Pavimentacao/ES-P33-05ReciclaPavimInSituAdicaoCimento.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2018.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER-SP.) **ET-DE-P00/035**: Reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com cimento e brita. São Paulo: DER-SP, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER-ME 181:** Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 1994. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me181-94.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNER-ME 083:** Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: DNIT, 1998a. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me083-98.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

_____. **DNER-ME 091:** Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: DNIT, 1998b. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me091-98.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

_____. **DNER-ME 201:** Solo-cimento – compressão axial de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: DNIT, 1994. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me201-94.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

_____. **DNIT-ES 167:** Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2013a. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit167_2013_es.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2018.

_____. **DNIT-ME 164:** Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 2013b.

_____. **Manual de restauração de pavimento asfáltico.** 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/..%5Carquivos_internet%5Cipr%5Cipr_new%5Cmanuais%5CManual_de_Restauracao.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2018.

_____. **DNIT-EM 050:** Pavimento rígido – cimento Portland especificação de material. Rio de Janeiro: DNIT, 2004. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dnit050_2004_em.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2018.

ESTEVEES, Sara Ferreira. **Reciclagem de pavimentos betuminosos**: influência da granulometria nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio com emulsão. 2014. 90 f. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Vias de Comunicação) – Universidade do Porto, Portugal, 2014.

FEDRIGO, W. et al. Procedimento para dosagem de misturas de reciclagem profunda de pavimento asfálticos com adição de cimento Portland. **Revista Pavimentação**, ano 12, n. 26, 2017. Disponível em: <https://issuu.com/revistapavimentacao/docs/revista_46/1?ff=true> Acesso: 05 mai 2018.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland**: definição das bases para um método de dosagem. 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/118850>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

GOOGLE MAPS. **Mapa**. 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

KLEINERT, Thaís Radünz. **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento**: Contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem. 2016. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MINGUELLA, J. D. **El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ com cemento**. 2011. 572 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidad de Burgos, Burgos, 2011.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookmann, 2013.

OLIVEIRA, Alexandre de; BARAN, Karin Rodrigues; SCHMIDT, Fernando da Silva. Reciclagem de pavimentos para restauração da BR-282 em Santa Catarina. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MODERNAS TÉCNICAS RODOVIÁRIAS, 6., 21 a 24 nov. 2010, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ACE, 2010. 14p.

OLIVEIRA, P. C. A. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis**. 2003. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2003.

OLIVEIRA, P.C. A.; SANT'ANNA, F. M. G.; SOUZA F. S. V. **Restauração do Pavimento da Rodovia SP-351: Através de Reciclagem das Camadas de Capa e Base Com Adição de Cimento Portland e Brita**. Relatório técnico. São Paulo: FRESAR, 2002.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. Análise das propriedades da base de solo-cimento deteriorada para fins de reciclagem profunda de pavimentos. In: CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS, 7., 10 a 12 abr. 2013, Lisboa. **Anais...** Lisboa: LNEC, 2013, 10 p.

_____. Reciclagem de pavimentos: estudo da influência do tipo de cimento Portland na resistência à compressão simples do material reciclado. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS E PROJETOS DE REFORÇO, 4., 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2009. 12 p.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – PCA. Design of full-depth reclamation with Portland cement (FDR-PC) pavements. In: 2010 ANNUAL CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA, 26 a 29 set. 2010, Halifax. **Papers...** Halifax: TAC, 2010. 12 p. disponível em: <<http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2010/docs/n1/halsted.pdf>>. Acesso em: out. 2017.

_____. **Guide to full-depth reclamation (FDR)**. 2017. Disponível em: <<http://www.cement.org/docs/default-source/fdr/guide-to-full-depth-reclamation-with-cement.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

SENÇO, Wlastemiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. v. 1.

_____. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Saraiva, 2001.

TORRES, Maria João Robalo Galante. **Efeito da água e de ciclos de gelo e degelo no comportamento de misturas recicladas a semi-quente**. 2009. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2009. Disponível em: <<http://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/3526>>. Acesso em: 8 out. 2017.

TRICHÊS, Glicério et al. Caracterização do comportamento mecânico de misturas recicladas com adição de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES, 7., 24 a 26 out. 2011, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABCR, 2011. 13p.

WIRTGEN. **Reciclagem a frio:** Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen. Windhagen, Alemanha: WIRTGEN Group, 2012. Disponível em: <http://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/infomaterial_1/kaltrecycler/kaltrecycling_technologie/kaltrecycling_handbuch/Cold_recycling_Manual_PT.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2018.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09